

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи

КОЛОДЯЖНЫЙ Дмитрий Юрьевич



**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК
ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ СПОСОБОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

Специальность 05.07.05– Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Нагорный Владимир Степанович

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	12
1 СОСТОЯНИЕ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛА И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	27
1.1 Патентные и библиографические исследования существующих способов и устройств повышения эффективности горения углеводородных топлив.....	27
1.2 Аналитический обзор современной научно-технической, литературы по влиянию электрического заряда капель топлива на процессы их горения	56
1.2.1 Исследование электрогидродинамического способа сообщения униполярного электрического заряда потокам и струям углеводородных топлив	57
1.2.2 Влияние электрического заряда капель на показатели эффективности процессов воспламенения и горения углеводородных топлив	61
1.3 Конструктивное исполнение топливных форсунок авиадвигателей	71
1.4 Аналитический обзор современной научно-технической литературы по численному моделированию процессов распыла и горения топлива	80
1.4.1 Численные модели и подходы применительно к решению задачи о распылении топлива в газовой среде	81
1.4.2 Численное моделирование процессов горения	95
1.5 Пути повышения эффективности процессов распыла, горения топлива авиационных двигателей. Постановка задачи исследования	101
1.6 Основные выводы по разделу.....	105

2	ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ТОПЛИВО, СООБЩЕНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ТОПЛИВУ И КАПЛЯМ ТОПЛИВА	110
2.1	Влияние электрического поля на вязкость топлива	110
2.2	Влияние электрического поля на поверхностное натяжение капель топлива	122
2.2.1	Модели влияния электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капель	124
2.2.2	Обобщенная модель влияния электрического заряда капель топлива на эффективное поверхностное натяжения с валидацией экспериментом...	140
2.3	Исследование метода сообщения электрического заряда каплям углеводородных топлив в резко неоднородном электрическом поле коронного разряда на выходе форсунки	142
2.3.1	Исследование метода сообщения отрицательного электрического заряда каплям углеводородных топлив в электрическом поле коронного разряда при отрицательном потенциале игольчатого электрода	149
2.3.2	Исследование метода сообщения положительного электрического заряда каплям углеводородных топлив в электрическом поле коронного разряда при положительном потенциале игольчатого электрода	156
2.4	Оценка максимальной для выбранного межэлектродного промежутка объемной плотности электрического униполярного заряда, модели его образования в потоке углеводородного топлива в резко неоднородном электрическом поле	164
2.4.1	Уточнение инжекционной модели образования униполярного потока ионов в углеводородном топливе в резко неоднородном поле	166
2.4.2	Инжекционная модель образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле в форсуночном модуле (электропневматической форсунке)	173

2.4.2.1	Методология уточнения инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле форсуночных модулей применительно к электропневматическим форсункам авиационных двигателей	173
2.4.2.2	Экспериментальное определение вольт-амперной характеристики электропневматической форсунки	176
2.4.2.3	Уточнение инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле электропневматической форсунки	180
2.5	Электрофизические и экспериментальные основы повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях с использованием переменных электрических полей	187
2.6	Выводы по разделу	192

3 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ

195

3.1	Критерии и показатели эффективности направлений исследований по разработке электрокаплеструйных форсуночных модулей	195
3.2	Стратегия исследований и разработок электрокаплеструйных форсуночных модулей	196
3.3	Разработка принципов и методологии построения электрокаплеструйных форсуночных модулей с улучшенными качественными показателями распыла углеводородного топлива по сравнению с существующими конструкциями	199
3.3.1	Разработка методов построения электрокаплеструйных форсуночных модулей авиадвигателей с использованием переменных однородных электрических полей	200
3.3.1.1	Метод повышения эффективности сгорания топлива в авиадвигателе с включением электрического устройства воздействия на топливо в	

гидравлическую цепь питания топливной форсунки	201
3.3.1.2 Метод повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолета без дополнительных конструктивных и технологических изменений в штатной топливной системе авиадвигателя	213
3.3.1.3 Метод повышения эффективности распыла топлива в форсуночных модулях с использованием резко неоднородных электрических полей в топливной форсунке	218
3.4 Разработка методов конструирования электрокаплеструйных электропневматических форсунок газотурбинных авиадвигателей с использованием резко неоднородных электрических полей	223
3.4.1 Конструктивная реализация электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного электрического поля с использованием внутреннего воздушного завихрителя	223
3.4.1.1 Разработка технологии реализации резко неоднородного электрического поля в новых конструктивных решениях электропневматической форсунке газотурбинных авиационных двигателей	235
3.4.1.1.1 Технология реализации резко неоднородного электрического поля в электропневматической форсунке	251
3.4.2 Методы обеспечения пожаровзрывобезопасности, электробезопасности и повышения быстродействия электрических устройств воздействия на топливо при конструктивной реализации электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного электрического поля	253
3.4.3 Разработка технологии получения и обработки электроизоляционных керамических деталей принципиально новых электрокаплеструйных электропневматических форсунок авиационных двигателей	266
3.4.3.1 Технология получения и обработки изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки	267

3.4.3.2	Технология изготовления изоляционных керамических деталей разработанных электропневматических форсунок	277
3.4.3.3	Разработка режимов обработки изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки	279
3.5	Выводы по разделу	280
4	ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА УНИПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ КЕРОСИНА В ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЯХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТУРБОРЕАКТИВНЫМ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ	283
4.1	Аналитический обзор литературы в области численного моделирования электрогидродинамических процессов в струях и потоках диэлектрических жидкостей	284
4.2	Численные исследования процессов переноса электрического заряда в модели электрокаплеструйного форсуночного модуля газотурбинного авиационного двигателя	294
4.2.1	Методология исследования	294
4.2.2	Математическая электрогидродинамическая модель и численный метод ее решения.....	298
4.2.2.1	Основные уравнения электрогидродинамических процессов переноса униполярного электрического заряда в форсуночных модулях	298
4.2.2.2	Численный метод анализа электрогидродинамических процессов переноса униполярного электрического заряда в форсуночных модулях	304
4.3	Моделирование течения топлива через завихритель форсуночного модуля турбореактивного авиационного двигателя	310
4.3.1	Постановка задачи	310
4.3.2	Результаты численных расчетов течения керосина ТС-1 в ЭКС форсуночном	

модуле применительно к турбореактивному авиационному двигателю ...	314
4.4 Исследование процесса переноса заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле авиационного турбореактивного двигателя при разных параметрах потока керосина и расчётной области	322
4.4.1 Постановка задачи	322
4.4.2 Результаты расчета для исходного варианта электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю	326
4.5 Исследование влияния размеров межэлектродного участка на перенос заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле	333
4.6 Влияние входных граничных условий на перенос заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле	336
4.7 Трехмерное моделирование течения керосина ТС-1 и переноса заряда в Электрокаплеструйных форсуночном модуле применительно к турбореактивному авиадвигателю	339
4.7.1 Постановка задачи	340
4.7.2 Результаты численного трехмерного моделирования электрогидродинамического течения закрученного потока керосина в ЭКС форсуночном модуле при различных методах (ILES и IDDES) применительно к турбореактивному авиационному двигателю	342
4.8 Выводы по разделу	349
5 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА УНИПОЛЯРНОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТОПЛИВО И РАСПЫЛА КЕРОСИНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГАЗОТУРБИНЫМ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ.....	352

5.1	Математические модели и методы численного расчета электрогидродинамических процессов переноса униполярного электрического заряда при работе ЭУВТ в цепи питания топливной352
5.2	Теоретические модели и численные расчеты ЭКС форсуночных модулей с Резко неоднородными электрическими полями в цепях подачи топлива и в самой электропневматической форсунке применительно к газотурбинным авиационным двигателям. Сравнительный анализ	...360
5.2.1	Численное моделирование электрогидродинамического процесса сообщения и переноса электрического униполярного заряда в потоке топлива (керосина) в форсуночных модулях360
5.2.1.1	Теоретическая модель описания электрогидродинамических процессов в форсуночных модулях. Численные решения в ANSYS CFX360
5.2.1.1.1	Численное моделирование процессов создания и переноса электрических зарядов в ЭУВТ в цепи питания форсунки газотурбинного авиационного двигателя364
5.2.1.1.2	Численное моделирование процессов создания и переноса электрических зарядов в электропневматической форсунке газотурбинного авиационного двигателя369
5.3	Математические модели и методы численного моделирования распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях377
5.3.1	Теоретические модели описания течения двухфазного потока и распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях	...377
5.3.2	Повышение точности численного моделирования процесса распада жидкой пленки в воздушном потоке выбором модели турбулентности	...386
5.3.3	Численное моделирование процесса распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях391
5.3.4	Верификация экспериментом основных положений теоретических моделей при численном моделировании процессов распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях408

5.3.4.1	Динамическое конструирование экспериментального образца пневматической форсунки с улучшенными характеристиками распыла топлива как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14.....	.417
5.4	Выводы по разделу421
6	МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ ФОРСУНОК. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ ПРИ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГАЗОТУРБИНЫМ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ	424
6.1	Математические модели и методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки. Верификация экспериментом при огневых испытаниях электрокаплеструйных форсуночных модулей	424
6.1.1	Базовые математические модели	427
6.1.2	Методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки	439
6.1.3	Верификация экспериментом численных моделей расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки	458
6.1.3.1	Результаты численных расчетов процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с	

резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки	458
6.1.3.2 Результаты огневых экспериментальных исследований процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки	462
6.1.3.3 Сопоставление с экспериментальными данными результатов численного моделирования влияния электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки	472
6.2 Математические модели и методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя типа ПД-14. Огневые экспериментальные исследования влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения	473
6.2.1 Численное моделирование сопряженного теплообмена в пневматической топливной форсунке (как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля) при двухфазном течении керосино –воздушной смеси	473
6.2.2 Огневые экспериментальные исследования влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14	479
6.2.2.1 Объекты огневых испытаний на пятигорелочном отсеке камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя ПД-14 влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения керосино-воздушной смеси	484
6.2.2.2 Принципиальная схема установки ОАО «ОДК-Авиадвигатель» для испытаний камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя с	

электрокаплеструйными форсуночными модулями	487
6.2.2.3 Методика проведения огневых испытаний электрокаплеструйных форсуночных модулей с пневматической форсункой применительно к газотурбинным двигателям	490
6.2.2.4 Методика обработки экспериментальных данных при проведения огневых испытаний электрокаплеструйных форсуночных модулей с пневматической форсункой применительно к газотурбинным двигателям	496
6.2.2.5 Результаты огневых экспериментальных исследований процессов горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14 с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания пневматической топливной форсунки	504
6.3 Выводы по разделу	515
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	518
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	526

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования по созданию высокоскоростных транспортных средств, обеспечению экологии и высокой энергоэффективности авиационных двигателей [43 - 47]. Нормы по уровню вредных выбросов от авиационных двигателей постоянно ужесточаются. В этом плане обеспечение качественного распыла топлива является ключевой задачей по обеспечению, как эмиссии вредных веществ, так и надежного розжига камеры сгорания в высотных условиях, когда распыл существенно ухудшается. Проблема усложняется ещё и тем, что требования по дальнейшему снижению массы двигателя, увеличению общего ресурса его работы приводят к необходимости снижать перепад давления топлива на форсунках, уменьшать габариты камеры сгорания. В результате, требуемое качество распыла можно обеспечить при помощи разработки специальных распыливающих устройств (пневматических форсунок), где вопросы взаимодействия воздушного потока с топливной пленкой, образующейся на сопле распыливающего устройства, становятся определяющими. Тенденция ужесточения международных норм на уровень выбросов вредных веществ при работе авиационного двигателя, вынуждает разработчиков интенсивно заниматься проектированием низкоэмиссионных камер сгорания. Ключевым аспектом в достижении целевых уровней эмиссии является управление временем пребывания и коэффициентом избытка топлива в зоне горения. Для эффективного регулирования данных параметров необходимо уметь управлять параметрами распыливания жидкого топлива в форсунке камеры сгорания газотурбинного двигателя.

Общей магистральной тенденцией развития авиационных газотурбинных двигателей [48] является дальнейшее повышение основных параметров их термодинамического цикла, в частности, температуры газа перед турбиной T_{Γ}^* . От авиационных двигателей четвертого поколения к авиадвигателям пятого поколения это повышение составило [48], соответственно, от $T_{\Gamma}^* = 1500 \dots 1700$ К

до 1900...1930 К. То есть при разработке авиадвигателей пятого поколения передовым научно-техническим коллективам удалось конструктивными методами повысить температуру газа перед турбиной T_T^* по сравнению с авиадвигателями четвертого поколения только в среднем на 315 К, что соответствует 42°C .

Следовательно, актуально повышение T_T^* даже на несколько десятков градусов Цельсия. То есть битва ведущих научных коллективов в мире при разработке авиадвигателей идет за каждый градус повышения температуры газа перед турбиной T_T^* при сгорании топливо-воздушной смеси.

В итоге это позволило добиться снижения удельного расхода топлива. При этом, у двигателей пятого поколения ожидается значительное улучшение экологических характеристик: снижение шума и эмиссии окислов азота.

В свою очередь, разработчики стремятся увеличить запасы по «бедному» срыву пламени в камере сгорания газотурбинных двигателей и тем самым снизить опасность появления пульсаций давления в камере сгорания или возбуждения вибрационного горения.

Таким образом, одним из путей решения обозначенной выше актуальной проблемы является улучшение качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях. Кроме того при этом могут улучшиться энергетические и экологические показатели работы авиационных двигателей.

Как правило, существенного улучшения качественных показателей существующими методами и технологиями не удаётся. Поэтому обеспечение заданных характеристик топливно-воздушной смеси при её сгорании с использованием новых физических явлений является актуальной задачей для авиакосмической промышленности.

В настоящей работе предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси, использовать электрокаплесруйные технологии с соответствующим образом организованными электрическими

полями в цепях подачи топлива к форсунке и (или) непосредственно в самой форсунке при распыливании топлива на капли.

Степень разработанности темы исследований. *Объектами исследований* в настоящей диссертации являются электрокаплеструйные методы и процессы при воздействии электрических полей на топливо, сообщении электрического заряда углеводородному топливу (керосину) и влияние электрического поля на процессы воспламенения и горения топлива применительно к камере подогрева стартер воздушно газовый (КП СТВГ) турбореактивного двигателя боевого самолета (разработки ОКБ им. А. Люльки, г. Москва) [38] и камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя ПД-14 [39 – 42, 154] (разработки АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь), предназначенного прежде всего для гражданских самолетов.

При этом предполагается использовать разработанную технологию динамического конструирования, по которой на основании разработанных математических моделей выбираются взаимосвязанные электрические, гидродинамические, газодинамические и конструктивные параметры модифицированных цепей подачи топлива, форсунок, форсуночных модулей и камер сгорания таким образом, чтобы обеспечить оптимальные показатели процессов распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси. Такой подход одновременно обеспечивает и многочисленные «ноу-хау», что наряду с патентной чистотой защитит отечественных производителей на рынке. При этом объектами исследований и разработок являются узлы распыла топлива (применительно к авиационным двигателям) с воздействием электрических полей на потоки топлива (керосина).

Известны методы динамического конструирования управляемого оборудования, разработанные в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ) профессором В.С.Нагорным, базирующиеся на линейных динамических моделях и передаточных функциях и методах теории автоматического управления. Использование линейного приближения при описании объектов исследования вносит определенные

ограничения их применимости при описании таких сложных нелинейных нестационарных процессов, как распыл и горение топлива. Поэтому в данной работе методы динамического конструирования получили дальнейшее развитие. Принципиальным отличием разработанных в данной диссертации методов динамического конструирования от известных является использование вместо линейных математических моделей современных численных моделей. Они используются в современных вычислительных средах для расчетного анализа сложных нестационарных трехмерных электрогидродинамических и гидрогазодинамических процессов распыла топлива в форсуночных модулях и горения топливно-воздушных смесей. При этом течения топлива и воздуха являются турбулентными.

Особенностью разрабатываемых электрокаплеструйных технологий является использование в отдельных случаях высокого напряжения (до нескольких киловольт). Поскольку электрическое поле прикладывается непосредственно к диэлектрической рабочей среде, каким является керосин, то высоковольтный усилитель имеет высокоомную нагрузку и рабочий ток составляет единица микроампера. Поэтому выходная мощность высоковольтного усилителя не превышает 1 Вт. При разработке маломощного (не более 1Вт) регулируемого высоковольтного усилителя для уменьшения весогабаритных показателей преобразуем входной сигнал в высокочастотное напряжение, которое затем с использованием повышающего малогабаритного трансформатора усиливается по амплитуде, выпрямляется с использованием схем умножения. Электрическая высоковольтная схема должна обладать внутренней электробезопасностью. Для устранения электростатического влияния выходного каскада на низковольтную часть и другую аппаратуру используется экранирование.

Указанные выше особенности динамического конструирования (наряду с другими) необходимо учитывать при расчетном анализе рассматриваемых процессов.

Цели и задачи. Цель диссертационной работы – решение актуальной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, разработки теории и методов конструирования на базе суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом эффективных узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей)¹ авиационных двигателей выбором их рациональных электрогидродинамических, гидродинамических, электрических, конструктивных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей.

Задачами исследований являются:

- разработка научно обоснованных технических и технологических решений при реализации разработанных новых электрокаплеструйных форсуночных модулей и технологий (без инерционных подвижных механических элементов), внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны;

- разработка и исследования эффективных электрокаплеструйных методов создания (без применения инерционных и ненадежных подвижных механических и электромеханических элементов) узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей) авиационных двигателей выбором их рациональных конструктивных параметров и использованием соответствующим образом организованных электрических полей, обладающих повышенными качественными показателями распыла топлива по сравнению с существующими конструкциями, и обеспечивающих улучшение процессов каплеобразования топлива, смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях.

Все это позволяет более эффективно управлять дисперсностью топлив, процессами образования, воспламенения и горения топливно-воздушных смесей в авиационных двигателях.

¹ Под электрокаплеструйным форсуночным модулем (форсуночным модулем) следует понимать собственно форсунку и электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ)

Научная новизна. Среди наиболее важных новых научных результатов, полученных в диссертации, можно отметить следующие.

В диссертации предложена стратегия исследований и разработок электрокаплеструйных форсуночных модулей с электрическими устройствами воздействия на топливо (ЭУВТ), основанная на разработанной технологии Динамического конструирования. Данная технология предусматривает использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау» за счет оптимального выбора взаимосвязанных электрогидродинамических, гидродинамических, конструктивных и электрических параметров. Мировая новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов подтверждены выдачей автору 6 патентов Российской Федерации [16 - 22].

Впервые применительно к газотурбинным авиационным двигателям (на примере современного авиадвигателя типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения топливно-воздушной смеси с использованием ЭУВТ и переменных однородных электрических полей с изменяющейся частотой, резко неоднородных постоянных и переменных электрических полей и их совместного использования. Разработаны принципы построения узлов электрокаплеструйных форсуночных модулей с использованием ЭУВТ в гидравлической цепи питания топливной форсунки и в самой форсунке и различных электрических полей.

Рассмотрены физико-химические основы воздействия на топливо переменных электрических полей и методы электризации углеводородных топлив. Показано, что электрический заряд капле углеводородных топлив не только уменьшает поверхностное натяжение капле, но и уменьшает диаметры капле при распыливании топлива. Впервые получена безразмерная формула зависимости поверхностного натяжения капле топлива от величины заряда,

хорошо отображающая результаты экспериментов и использованная при дальнейших численных расчетах по распылу топлива и горения топливно-воздушной смеси.

Разработаны методы повышения эффективности электризации углеводородных топлив и топливно-воздушных смесей и математические модели электрогидродинамических и электрогазодинамических процессов сообщения униполярного электрического заряда углеводородным топливам при приложении резко неоднородного электрического поля. Проведен анализ физических моделей образования заряда в потоке топлива в резко неоднородном электрическом поле ЭУВТ и предложено для дальнейших численных исследований принять инжекционную модель. При этом на базе проведенных экспериментальных исследований уточнена инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в потоке керосина в резко неоднородном электрическом поле, используемая в дальнейших численных расчетах.

В рамках рассматриваемой проблемы автором разработан, теоретически исследован с верификацией экспериментом и обобщен целый ряд принципиально новых электрокаплеструйных методов распыла топлива, горения топливно-воздушной смеси в камерах сгорания авиадвигателей. Последнее в сочетании с разработанными численными моделями рассматриваемых процессов и основными полученными (как правило, впервые) теоретическими и экспериментальными результатами представляет весьма универсальный аппарат теоретического и практического анализа разработанного нового класса форсуночных модулей и электрокаплеструйных технологий и определяет дальнейшие пути целенаправленного поиска частных электрокаплеструйных методов (см, например, [19, 10, 23, 27]), а также детальные дальнейшие исследования влияния параметров электрических полей на распыл топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях. При этом новыми являются большинство результатов, поскольку большинство методов и электрокаплеструйных форсуночных модулей применительно к авиационным двигателям исследовано и разработано впервые.

Разработаны численные модели (с учетом уточненной инжекционной модели и полученной формулы влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капли топлива):

- электрогидродинамических процессов образования заряда в резко неоднородном электрическом поле вблизи поверхности электрода типа «игла» и его распространения в закрученном потоке топлива применительно к электрокаплеструйным форсуночным модулям;
- процессов течения двухфазных потоков, позволяющие описывать течения топлива с воздухом и определять характеристики распыла;
- процессов течения газа, распространения и испарения капель, горения и образования вредных веществ в камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя.

Разработана численная электрогидродинамическая модель электрокаплеструйного форсуночного модуля, в котором электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки, причем при снятии напряжения с электродов форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды работает как электрокаплеструйный форсуночный модуль. Проведено (с помощью открытого пакета OpenFOAM и использованием вихререзающих подходов для моделирования турбулентности DES и LES) трехмерное численное моделирование закрученного турбулентного течения керосина как без, так и с учётом электрогидродинамического взаимодействия. Показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение топлива (керосина) является осесимметричным и профили скорости закрученного потока топлива могут быть аппроксимированы гауссовым распределением; течение керосина является нестационарным; за счёт интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки заряда достигает около 80% инжектируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный поток керосина. Проведены исследования влияние расположения игольчатого электрода относительно изолирующей шайбы между цилиндрическими электродами и степени закрутки

керосина в форсуночном модуле на количество выносимого заряда закрученным потоком на выходе форсунки и даны рекомендации по оптимизации конструкции электрокаплеструйного форсуночного модуля.

Теоретически исследованы процессы сообщения электрического заряда каплям топлива в топливно-воздушной смеси в поле коронного разряда, а также другие способы влияния электрического заряда капель топлива на вязкость и поверхностное натяжение капель. Исследованы динамические характеристики процессов приобретения как отрицательного, так и положительного электрического заряда каплями различных углеводородных топлив в зависимости от их диэлектрической проницаемости, диаметров капель, напряженности электрического поля. На основании полученных результатов исследований сформулированы требования к скорости и параметрам капель углеводородных топлив для обеспечения их максимального заряда в электрическом поле коронного разряда.

При численном трехмерном моделировании рассматриваемых нестационарных процессов, характерных для авиационных двигателей, решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей с целью получения наибольшего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными:

- использованием соответствующих геометрий неравномерных расчетных сеток при существенном увеличении числа элементов расчетной сетки (средний размер расчетной сетки составил порядка 30 миллионов объемных элементов);
- использованием новых подходов к численному моделированию на основе математической модели QMOM;
- трехмерных геометрических моделей реальных конструкций;
- адаптивной схемы иерархического последовательного усложнения модели;
- рациональных вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности:
- метод крупных вихрей LES, когда крупные вихри рассчитываются, а

мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются с использованием большого числа объемных элементов расчетной сетки;

-метод отсоединенных вихрей DES, удачно сочетающий сильные стороны модели SST (RANS), а именно надежность расчета безотрывных течений, с возможностью расчета течений с обширными зонами отрыва, обеспечиваемой моделью LES);

- использованием современных вычислительных сред (ANSYS Fluent, ANSYS ICEM CFD, OpenFOAM), приспособленных автором к решению таких сложных процессов, как рассматриваемые электрогидродинамические процессы.

Например, в разработанных моделях используются преимущественно гексагональное разбиение расчетной области с дополнительным сгущением в области распыла. При этом в качестве формы элемента используются правильные параллелепипеды и тетраэдры, дающие большую точность в численных расчетах.

На основании проверенных экспериментом разработанных численных моделей проведены численные исследования влияния конструктивных, электрогидроаэродинамических, гидродинамических, электрических параметров на параметры распыла и горения, обобщены результаты численных исследований, даны рекомендации по выбору и выбраны рациональные параметры форсуночных модулей. Предложены пути дальнейшего совершенствования электрокаплеструйных форсуночных модулей.

Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере оптимизированного при различных режимах работы авиадвигателя с этих позиций образца экспериментальной пневматической форсунки для современного авиадвигателя ПД-14 (ЭОФ), как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля. Для него выбраны (с позиций обеспечения требуемых газодинамических характеристик воздушного потока в форсунке и на выходе из нее, равномерности распределения жидкой фазы в топливно-воздушной смеси. конуса распыла керосина, температурных полей и термонапряженного состояния ЭОФ) рациональные конструктивные параметры: внутренний диаметр сопла форсунки; расположение внутреннего воздушного завихрителя; угол закрутки газового

потока; параметры рабочей жидкости; соотношение чисел Вебера потоков для струй топлива и воздуха (соотношение импульсов потоков струй соответствующих сред); количество тангенциальных топливных пазов и диаметр сопла распылителя форсунки; диаметр сопла наружного воздушного завихрителя с плавным профилем сопла и с конструкцией лопаток с галтелями в области сопряжения с несущими элементами конструкции; скругления в местах входящими углами. Для этих параметров в рамках разработанной стратегии исследований впервые изготовлены и экспериментально исследованы ЭОФ, результаты которых подтвердили достоверность разработанных численных моделей. Установлено, что при полученных на основании численных расчетов конструктивных параметров форсунки максимальные скорости потока воздуха находятся в межлопаточном канале воздушного завихрителя, что обеспечивает стабильность характеристик воздушного потока, обдувающего факел распыла керосина. Кроме того, исключается попадание топлива на поверхность сопла наружного воздушного завихрителя, что в свою очередь улучшает равномерность распределения топлива в окружном направлении, а также обеспечивается долговечность работы пневматической форсунки. Определен характер образования и разрушения топливной пленки во времени.

Для верификации экспериментом результатов численного моделирования электрогидродинамических и гидродинамических процессов распыла топлива (керосина) впервые в мировой практике изготовлены (на основании результатов численных 3D CFD расчетов) экспериментальные образцы электрокаплеструйных форсуночных модулей (электропневматической форсунки) с электродной системой ЭУВТ внутри форсунки (ЭПФ) с организацией резко неоднородных электрических полей, имеющих идентичные параметры по расходу топлива и воздуха, а также внешние установочные параметры как и в ЭОФ. Показано, что для одновременного обеспечения жаропрочности и диэлектрических свойств (применительно к условиям работы авиадвигателей) в качестве изолирующего материала соответствующих деталей ЭПФ целесообразно выбрать корундоциркониевую керамику, состоящую из оксида алюминия Al_2O_3 – 95% и

диоксида циркония ZrO_2 – 5%. Впервые разработаны технология получения и обработки изоляционных керамических деталей ЭПФ из корундоциркониевой керамики. Разработанные технологии представляют самостоятельный научный и практический интерес не только для авиадвигателестроения, но и для других отраслей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Научная ценность предложенных электрокаплеструйных методов и технологий определяется их общностью и достоверностью, что доказано сравнительной оценкой результатов теоретических и экспериментальных исследований на реальных авиационных двигателях.

Предложены обобщенные методологические принципы разработки конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей, позволяющие выполнить электрогидро(газо)динамическую их часть в модульно-блочном исполнении, упорядочить и идейно объединить теоретический анализ влияния основных электрических и конструктивных параметров на статические и динамические характеристики рассматриваемых устройств. Сведена к минимальному базовому набору конструктивных и электрических блоков реализация наиболее перспективных принципов построения электрокаплеструйных форсуночных модулей, что позволяет выполнить электрокаплеструйных форсуночные модули в модульно-блочном исполнении.

Совокупность полученных результатов составляет научные основы расчета и современного конструирования эффективных электрокаплеструйных форсуночных модулей.

Разработаны теоретические модели и методы численного расчета с использованием суперкомпьютерных вычислений с верификацией экспериментом рассматриваемых процессов, позволяющие выбрать рациональные соотношения между электрическими, гидро(газо)динамическими и конструктивными параметрами электрокаплеструйных форсуночных модулей.

Основные результаты получены лично автором или с его непосредственным участием.

Реализации полученных результатов позволит [25, 75] более эффективно управлять (в том числе от микроЭВМ) дисперсностью топлив, процессами образования топливно-воздушных смесей, испарения топлив, воспламенения и горения топлив и их смесей.

При использовании результатов диссертации в организации рабочего процесса в камерах сгорания турбореактивных двигателей можно уменьшить [25, 75] количество возникающего дыма и других твердых продуктов неполного горения, поскольку ожидается при сообщении униполярного электрического заряда в резко неоднородном электрическом поле сжигаемому топливу существенное уменьшение дымления и сажевыделения в факеле.

Кроме того, стабилизация пламени и расширение концентрационных пределов воспламенения топлив при сообщении им униполярного электрического заряда в резко неоднородном электрическом поле может иметь большое значение для стабилизации открытого турбулентного пламени и нормальной устойчивой работы камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей высокой мощности. В свою очередь, увеличение полноты сгорания заряженного таким образом топлива дает возможность повысить в высотных условиях дальность полета самолетов, ракет и т.п., поскольку повышение полноты сгорания в сущности эквивалентно повышению теплотворной способности топлива [25, 75].

В камерах сгорания для сжигания предварительно испаренного топлива в случаях его электризации методами, разрабатываемыми в данной диссертации, ожидается интенсификация процесса сгорания, увеличение полноты сгорания и концентрационных пределов воспламенения, что очень важно для стабилизации пламени той категории двигателей, в которых топливо используется в газообразном состоянии.

Кроме того, полученные при реализации результаты могут эффективно использоваться в двигателях внутреннего сгорания, поскольку ожидается увеличение скорости распространения пламени, снижения температуры появления холодного пламени и улучшение других показателей.

Использование полученных результатов в автомобилестроении позволит уменьшить в отработавших газах автомобилей выброс токсичных компонентов за счет ускорения окислительных реакций и более полного сгорания топлива, что улучшит экологическую обстановку.

Тиражируемость полученных результатов: в оборонных и наукоемких отраслях промышленности при разработке различных типов двигателей: в газотурбинных двигателях, в форсажных камерах сгорания турбореактивных двигателей, в камерах сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей высокой мощности, в двигателях с впрыском топлива, в дизельных и карбюраторных двигателях; при разработке различного рода горелок; в других приложениях.

Использование полученных результатов в различных отраслях позволит увеличить наукоемкий экспортный потенциал экспортируемой продукции.

Методология и методы исследования, как уже отмечалось выше, основаны на разработанной технологии Динамического конструирования, предусматривающей использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании.

На защиту выносятся:

1. Теоретические и экспериментальные исследования электрокаплеструйных технологий распыла керосина на капли и горения керосино-воздушной смеси с постоянными и переменными электрическими полями в цепях подачи топлива к форсунке и (или) непосредственно в самой форсунке применительно газотурбинным авиационным двигателям на базе разработанной технологии Динамического конструирования.

2. Разработанные математические модели электрогидродинамических и гидрогазодинамических процессов распыла топлива, горения топливно-воздушной смеси в камере сгорания газотурбинного авиадвигателя.

3. Экспериментальные и теоретические результаты исследования разработанных электрокаплеструйных методов и технологий повышения эффективности распыла топлива, горения топливно-воздушных смесей в авиационных двигателях.

Степень достоверности и апробация результатов. Подтверждены базовые положения теоретических моделей путем сравнительного анализа результатов численных расчетов и экспериментов, проведенных на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании. Достоверность полученных результатов также подтверждена корректным использованием математического аппарата.

Основные полученные в диссертации результаты автором опубликованы в 55 работах автора [1 – 42,73,74,154-162, 265, 319], в том числе 18 статей опубликовано в журналах, рекомендуемых ВАК[1 – 5, 8–10, 29, 30, 36, 37, 155-160], 12 статей опубликовано в иностранных и отечественных журналах, индексируемых в базе Scopus [1 – 7, 28, 157 – 160], в 2 –х изданных учебных пособиях [32 – 33], в 7-и отчетах по прикладным научным исследованиям, выполненным для АО «ОДК-Авиадвигатель» и ОКБ им. А. Люльки [38 – 42, 154, 265]. Мировая новизна и практическая значимость полученные в диссертации результаты подтверждены выдачей 6 патентов Российской Федерации [16 – 22] на разработанные электрокаплеструйные технологии повышения эффективности распыла топлива, горения топливно-воздушная смеси в авиационных двигателях и электрокаплеструйных устройств, их реализующих.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на Международных конференциях как за рубежом, так и в России [6,7,11,13-15,23-28,31,73,74,161,162,319].

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка используемых источников, содержит 191 рисунков, 56 таблиц. Объем работы 562 страниц. Список используемых источников содержит 329 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛА И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1 Патентные и библиографические исследования существующих способов и устройств повышения эффективности горения углеводородных топлив

К настоящему времени запатентовано во всем мире довольно большое количество способов повышения эффективности процессов горения углеводородных топлив и устройств, их реализующих. Нас прежде всего интересовали существующие способы и устройства, в которых использовались различным образом организованные электромагнитные воздействия на потоки углеводородных топлив в различных двигателях. Поэтому проведен патентный поиск [51 – 70] по способам и устройствам интенсификации процессов горения углеводородных топлив в классах Международной патентной классификации МПК F02M 27/04, F02M, F23C13/00, F23D 11/32, F23D 11/38, F02M 27/00, F02M27/02, F02B51/02, F23D14/24, F23N5/00, F23G5/00, F01N3/08. Проведен также анализ имеющейся литературы по этому направлению (см., например, [49, 50, 71,72]) с обширными библиографическими ссылками.

В результате установлено, что в настоящее время для повышения эффективности процессов горения углеводородных топлив наиболее широко используются следующие способы воздействия на топливо:

- сильным магнитным полем [71,72,120];
- комбинированное воздействие магнитными и электрическими полями и таким образом организуется электромагнитное воздействие [53, 66, 61, 71 – 72,120];
- сильным однородным постоянным электрическим полем [51, 55 – 56, 60, 66, 71 – 72,120];
- сильным однородным переменным электрическим полем [50, 65, 66];

– сильным резко неоднородным постоянным электрическим полем [53, 58, 64–65, 71, 72,120];

– сильным резко неоднородным переменным электрическим полем [52, 54, 62, 63, 66, 71 – 72,120];

– относительно слабым переменным электрическим полем [59, 67].

При этом, как правило, данные воздействия на топливо организовывались применительно к двигателям внутреннего сгорания и к различного типа горелкам.

Применительно к газотурбинным двигателям использование электрических полей для повышения эффективности сгорания керосина рассматривается в данной диссертации впервые.

Проанализируем динамику разработок способов повышения эффективности сгорания углеводородных топлив с выделением основных положений, которые в дальнейшем могут быть положены в основу разработки новых способов повышения эффективности горения керосина в газотурбинных двигателях.

Сразу же отметим, что физика процесса воздействия сильных магнитных и электрических полей на топливо, его структуру и его свойства пока до конца не ясна. Это же можно сказать и применительно воздействия электрических полей на горение углеводородных топлив.

Имеются целый ряд предполагаемых моделей влияния сильных магнитных и электрических полей на процессы горения топлива.

По одной из них [72] эти процессы при приложении магнитного поля к топливу можно объяснить, исходя из следующих предпосылок. В бензине и дизельном топливе (независимо от октановых и цетановых чисел) под воздействием интегрированных полиградиентов: температуры, давления, вязкости, серы, смол, масел, конденсата и других химических присадок всегда происходит формирование уплотнённых групп углеводородных молекул и до 60% из них, не сгорая, выбрасываются с выхлопом. Под воздействием сильных магнитных полей сложные молекулы топлива изменяют свои структуры и свойства, в частности, частично дробятся, частично ионизируются вследствие мощного влияния внешнего магнитного или электромагнитного поля. В то же

самое время молекулы углеводорода изменяют свою конфигурацию, вследствие этого сила связи между молекулами топлива и их поверхностное натяжение в кластерах топлива существенно уменьшается. Такой магнитный активатор топлива ускоряет процесс дробления кластеров топлива и эффективно разделяет длинные и сложные частицы топлива на более мелкие фракции, т.е. повышает тем самым внутреннюю энергию топлива и равномерно распределяет их в потоке таким образом, чтобы горение топлива в ДВС происходило более эффективно. Топливо, проходящее через этот магнитный активатор, активируется отчасти и потому, что некоторые молекулы топлива на время превращаются в катионы, и значит активнее соединяются с окислителем – кислородом. Сгорание топлива в двигателе внутреннего сгорания становится существенно более эффективным,

Показано [76], что воздействие электромагнитных полей на углеводороды может приводить к тем же результатам, что и термическое разложение, то есть к укорачиванию углеродных скелетов продуктов разложения при равенстве атомарного состава продуктов разложения и исходного углеводорода. Таблица 1.1 иллюстрирует процессы такого разложения.

Из таблицы 1.1 [76] следует, что при всех возможных вариантах деструкции изооктана суммарная теплота продуктов деструкции увеличивается по сравнению с теплотой сгорания исходного углеводорода. До и после магнитной обработки у образцов топлива наблюдалось изменение коэффициента поверхностного натяжения и некоторых других физико-химических параметров.

Таблица 1.1 – Возможные процессы деструкции изооктана.

Направления деструкции молекул изооктана		
Исходная молекула и теплота ее сгорания	Возможные продукты деструкции	Теплота сгорания образовавшихся молекул
C_8H_{18} ; $Q=47,98$ МДж/кг	$4C_2H_4 + 2H$	$Q=48,46$ МДж/кг (+1%)
C_8H_{18} ; $Q=47,98$ МДж/кг	$C_2H_2+2C_2H_4+3CH_4$	$Q=48,21$ МДж/кг (+0,5%)
C_8H_{18} ; $Q=47,98$ МДж/кг	$0,5C_2H_4+2C_2H_2+3CH_4$	$Q=48,83$ МДж/кг (+1,8%)

Коэффициент поверхностного натяжения всех испытанных бензинов снижается после воздействия электромагнитным полем. Соответствующим образом это отражается на изменении плотности, кинематической вязкости и, как конечный результат, отмечается снижение температуры вспышки на 5⁰С для всех без исключения образцов бензина.

В начале 1990-х годов начались разработки катализаторов, устанавливаемых перед системой впрыска топлива в двигатель внутреннего сгорания [146]. Первые такие устройства представляли специальным образом изготовленные фигурные пластины из магнитных или немагнитных материалов, устанавливаемые непосредственно в карбюраторы. Такие пластины часто называли гомогенизаторами смеси. Их эффективность оказалась незначительной. На смену им пришли катализаторы, которые, активно влияя на рабочую смесь перед впрыском в двигатель, изменяли ее свойства в лучшую сторону настолько, что это улучшение, по мнению изобретателей, становилось заметным даже невооруженным глазом.

Наиболее известны устройства магнитной обработки топлива: «Шланг ионизатор» производства России, FUEL MAX («Фьюл Макс») производства США и разного рода поляризаторы топлива, среди которых можно выделить таблетки-катализаторы производства Англии и катализатор «Power Cat» производства США. Мировой авто гигант - Дженерал Моторс Корпорэйшн запатентовал научно-техническую разработку (патенты №№ 4.802.931; 4.496.395; 7.458.412), экспортируя аналогичные изделия FUEL MAX для всех марок топлива и типов двигателей. Общее для магнитных активаторов топлива состоит в том [76, 65], что в любой их конструкции всегда есть мощные неодимовые магниты. Напряженность магнитного поля магнитного активатора составляет 12000 Гаусс и выше. Магнитные активаторы топлива отличались высокой стоимостью используемых редкоземельных металлов и их сплавов, а также отсутствием регулятора воздействия на топливо. Кроме того, устройство Power Cat было рассчитано на западные типы бензина и оказалось малоэффективным при использовании на нашем рынке.

Один из последних отечественных вариантов таких устройств был разработан [76, 65] на производственной базе Московского энергетического института (МЭИ) и получил название автомобильный синтезатор-катализатор (АСК). В нем, как и в устройстве «Фьюл Макс», организован поток топлива через зону с магнитным полем. Однако это воздействие не постоянно во времени. В описании указывается, что при прохождении топлива через зазор в магнитном поле происходит разделение заряженных радикалов, и их движение к диэлектрическим элементам, где они, накапливаясь, создают участки с объемным электрическим зарядом и сильным электростатическим полем. При определенных значениях параметров этих полей в топливном тракте возникают процессы, способные менять состояние молекул топлива. Под воздействием АСК топливная система автомобиля приобретает каталитические свойства. В результате увеличивается количество свободных радикалов в топливовоздушной смеси, что приводит к более полному сгоранию топлива и, как следствие, к снижению уровня вредных выбросов окиси углерода и углеводородов. Появление в топливной системе молекулярных комплексов с меньшим числом атомов углерода приводит к тому, что меняется температура воспламенения и характер его горения. Более мягкая работа двигателя с меньшими ударными и динамическими нагрузками, возможность его работы с увеличенными углами опережения зажигания подтверждают то, что компоненты топлива воспламеняются при различной температуре с некоторой задержкой по времени.

Разработан [72] комбинированный магнитоэлектрический активатор топлива с внешним размещением магнитов, в котором используются мощные магнитные и электрические поля. По мнению авторов разработки, этими мощными магнитными и электрическими полями и самой неодимовой магнитно-энергетической решеткой данный модификатор разрывает (просеивает) углеводородные цепочки из сгустков компонентов топлива, модифицируя воздушно-топливную смесь в однородную массу, повышая её теплотворность и обеспечивает полное сгорание уже иного полученного на выходе магнитного активатора, более энергетически насыщенного топлива.

В [68] применительно к двигателям внутреннего сгорания (ДВС) рассмотрено устройство воздействия на углеводородное топливо с однородным переменным электрическим полем, создаваемым между коаксиальными цилиндрическими электродами, между которыми протекает топливо. При этом используется относительно низкая величина напряжения на электродах – до 600 В. Как будет показано ниже, при экспериментальных исследованиях на различных типах двигателей данное устройство повышает эффективность работы ДВС.

Следует отметить, что время релаксации у углеродного топлива при воздействии на него сильным постоянным электрическим полем может быть небольшим, поэтому активированное топливо необходимо использовать по истечении небольшого времени после активации. Однако наблюдались случаи роста степени активации топлива после окончания воздействия на топливо электрического поля.

В [66] рассмотрено устройство для обработки топлива в двигателе внутреннего сгорания путем одновременного воздействия на поток топлива сильными электрическим и магнитным полями. В полости обработки создается высокоградиентное магнитное поле высокой напряженности, а с использованием высоковольтного источника в полости обработки возникает и переменное во времени электрическое поле. Поскольку топливо движется через полость обработки с высокоградиентным магнитным полем, то действие этого поля будет как бы переменным во времени. Так, например, на некоторую частицу топлива в один момент времени будет действовать поле одного направления, а в другой - поле противоположного направления. Это определяет, по мнению автора, высокую эффективность обработки как магнитным, так и электрическим полем.

Авторы патента [66] объясняет физическую картину происходящих при этом процессов в топливе следующим образом. Известно, что магнитное поле, действуя на вещество, вызывает прецессию осей электронных орбит атомов и молекул вокруг направления этого поля. Эта прецессия происходит с частотой Лармора, зависящей от массы и заряда частицы и от величины напряженности

магнитного поля. Смена знака поля приводит к изменению направления прецессии. Таким образом, магнитное поле приводит к некоторому упорядочению молекул в веществе, а смена знака вызывает расшатывание имеющейся структуры. Согласно существующим теоретическим представлениям, жидкое вещество (в том числе и углеводородное топливо) состоит из отдельных кластеров различных геометрических размеров, которые, в соответствии с принципом минимума полной энергии, можно рассматривать как совокупность электрических и магнитных диполей со средним значением электрического и магнитного моментов в объеме кластера, равным нулю. При действии переменных во времени и пространстве электрического и магнитного полей происходит разрыв объема того или иного кластера, приводящий к образованию мелкодисперсной смеси в обрабатываемой среде и облегчающий доступ воздуха к частицам топлива.

Характерной особенностью устройства [66] является использование тонкого слоя диэлектрического материала (например, из тефлона) на подключенных к высоковольтному источнику напряжения электродах. Последнее улучшает, по мнению автора, качество обработки топлива за счет снижения потерь энергии на создание электрического поля между электродами. В [56] в камере обработки топлива между разнополярными электродами также размещают слой диэлектрического материала толщиной от $4 \cdot 10^{-6}$ м до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. В результате увеличивается градиент электрического поля внутри камеры обработки и, как следствие, увеличивается степень диспергации топлива при одновременном снижении энергетических затрат. В устройстве для электрокаталитической обработки топлива [62] содержащем диэлектрический корпус для пропускания топлива, электроды, установленные с зазором, между которыми протекает топливо, соединены с электрическим генератором и покрыты катализатором. Генератор снабжен модулятором частоты с возможностью воздействия на топливо, находящееся в межэлектродном зазоре высокочастотными модулированными полями. Наличие модулятора частоты соединенного с высокочастотным генератором переменного электромагнитного

поля позволяет помимо задающей частоты генератора воздействовать на топливо колебаниями на частотах, кратных собственным колебаниям атомов в молекулах топлива. Высокочастотные модулированные таким образом электрические поля позволяют усилить резонанс на гармониках при обработке топлива в межэлектродном зазоре. Это обеспечивает, по мнению авторов, активацию топлива и частичное разрушение межмолекулярных связей. Использование электродов, покрытых катализатором [62], приводит к дополнительной активации предварительно разрушенных молекул топлива и диссоциации водорода. Причем электроды могут быть выполнены любой формы цилиндрическими, плоскими, заостренными и т.д. Образовавшийся водород, попадая в камеру сгорания с очередной порцией топлива, выполняет роль катализатора процессов горения. Под действием высокочастотных полей топливо энергетизируется путем частичного разрушения межмолекулярных связей и одновременной диссоциации водорода на электродах, покрытых катализатором. Параметры высокочастотного генератора, снабженного модулятором частоты, определяются опытным путем и зависят от электропроводности топлива и межэлектродного зазора. Экспериментальный подбор катализаторов определяется по снижению вредных веществ в выхлопных газах в двигателях внутреннего сгорания. В состав катализаторов могут входить металлы VIII группы периодической системы Д.И. Менделеева или пористая платина. Например, при установке данного устройства на такси ГАЗ 3110 - Волга с объемом двигателя 2,4 л в качестве материала катализатора на электродах использовался никель.

В [53] создают в камере обработки топлива резко неоднородное по пространственным координатам электрическое поле с максимально возможными перепадами напряженности, способствующими наиболее эффективной интенсификации процесса образования мелкодисперсной топливно-воздушной смеси. Для этого положительный электрод выполнен с заостренными пилообразными или игольчатыми выступами (рисунок 1.1).

На рисунке 1.1 обозначены: 1 - корпус из диэлектрического материала, например, аминопласта, полиамида 610 литьевого; 2 - входной штуцер для

подвода и обрабатываемого топлива; 3- выходной штуцер для отвода обрабатываемого топлива ; 4 - протяженный положительный электрод , подключенный токопроводом 5, изолированным от корпуса 1 втулкой 6, к высоковольтному источнику напряжения (не показан); 7 - полость обработки, образованная пространством между положительным электродом 4 и внутренней поверхностью корпуса 1; 8 - отрицательный электрод, установленный снаружи корпуса 1 против полости обработки 7, подключенный на "массу"; 9 - заостренные пилообразные или игольчатые выступами внутреннего положительного электрода.

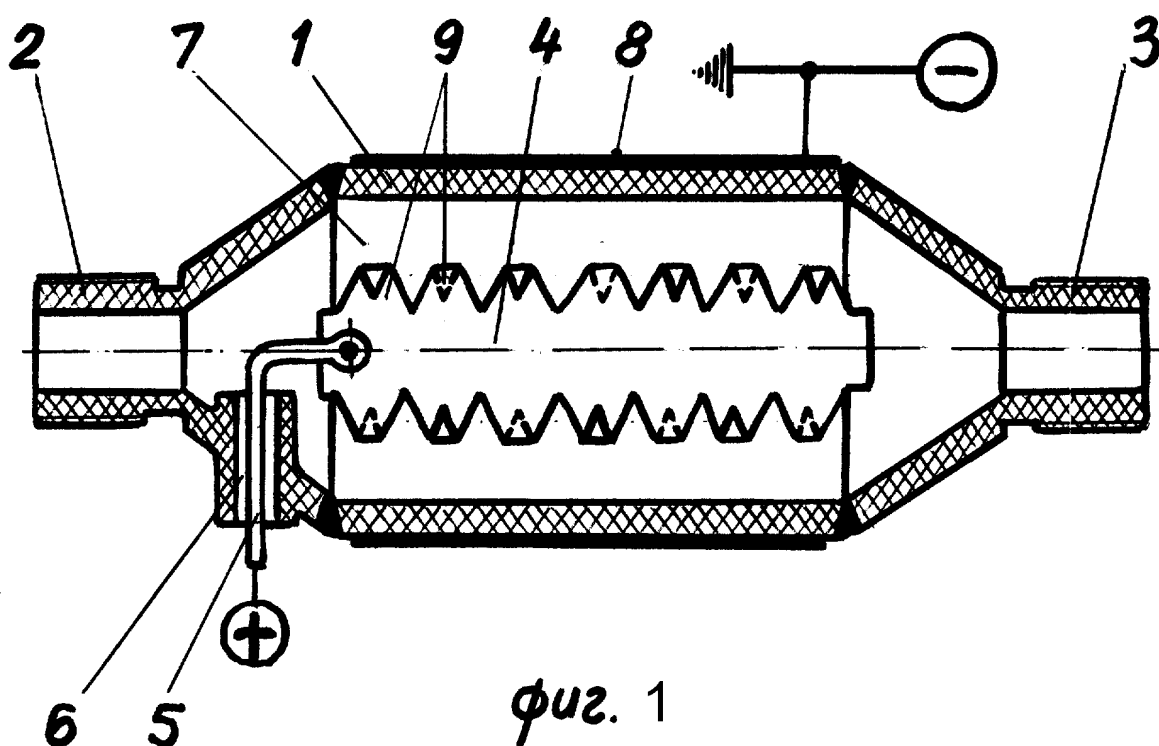


Рис. 1.1 – Пример реализации (взят как базовый рисунок из [15]) резко неоднородного электрического поля в устройстве обработки углеводородного топлива перед его подачей в форсунку

В качестве материалов электродов могут быть взяты, например, латунь, алюминий, медь. В качестве высоковольтного источника напряжения может быть взят любой, создающий постоянное напряжение до 5 кВ и обеспечивающий соответствующие токи нагрузки, которые в углеводородных топливах, как в диэлектриках, составляют единицы микроампер.

В [59, 67] рассмотрены способы воздействия на поток углеводородного топлива относительно слабым переменным электрическим полем.

Как и вышерассмотренных случаях подготовительный этап расщепления жидких углеводородных систем на отдельные элементы может заключаться в воздействии различным образом организованных электрических полей. Эти воздействия направлены на получение дополнительной энергии каждым из связанных атомов углеводородной системы, что приводит к уменьшению энергии связи атомов в молекуле. Одним из перспективных физических методов решения этой задачи является метод воздействия переменным электрическим полем. Причем напряженности поля, приложенные к топливу, могут иметь относительно небольшие значения.

Имеющиеся экспериментальные данные по сравнительной оценке воздействия постоянных и переменных полей говорят о следующем [65, 76]:

- изменение физико-химических свойств углеводородных топлив происходит под действием постоянных и переменных электрических полей, причем воздействие переменных полей оказывается более эффективным;
- в наибольшей степени эффект деструкции молекул под действием переменного электрического поля наблюдается у насыщенных и ароматических углеводородов.
- энергия электрического поля, создаваемая низковольтным генератором, мала и недостаточна для деструкции значительного числа молекул углеводородного топлива.

Таким образом, слабое переменное электрическое поле не может являться непосредственной причиной деструкции значительного числа молекул углеводородов и, тем более, отвечать за их деструкцию после прекращения своего действия (данный эффект подтвержден экспериментально). Следовательно, эти

экспериментальные факты должны объясняться другим механизмом. Таким механизмом, по мнению авторов [65,76], являются цепные химические реакции, открытые Лауреатом Нобелевской премии по химии академиком Н.Н.Семеновым. При деструкции углеводородных молекул возникают чрезвычайно активные химические радикалы, которые и обеспечивают протекание цепных химических реакций. Появление активной частицы - свободного радикала или атома вызывает большое число (цепь) последовательных превращений неактивных молекул. Свободные радикалы или атомы, в отличие от неактивных молекул, обладают свободными ненасыщенными валентностями (непарным электроном), что приводит к их взаимодействию с исходными молекулами. При первом же столкновении свободного радикала (R°) с молекулой происходит разрыв одной из валентных связей последней, и, таким образом, в результате реакции образуется новая химическая связь и новый свободный радикал, который в свою очередь реагирует с другой молекулой - происходит цепная реакция.

Активной частицей может являться и возбужденная исходная молекула. В этом случае возникает энергетическое разветвление цепей, в результате которого нарушается равновесное распределение молекул по энергиям. При этом сверхравновесная концентрация молекул во вращательно-возбужденных состояниях быстро, в результате нескольких соударений, уменьшается до равновесной, в то время как для диссипации энергии молекулы с возбужденными колебательными уровнями необходимо ее участие в тысячах соударений. Это значит, что время жизни молекулы, у которой возбуждены колебательные уровни много больше, чем у молекулы с возбужденными вращательными уровнями.

Термином "разветвление" обозначают входящую в такие реакции стадию размножения активных частиц.

Другим механизмом возникновения активных частиц является возбуждение колебательных уровней молекул. При возбуждении колебательных уровней C – C и C — H связи в молекуле не разрываются, но возбужденная молекула становится активной частицей с повышенной реакционной способностью и длительным (исчисляемым часами) временем существования в возбужденном состоянии. Такое

время существования активной частицы может объяснить длительность деструкции молекул декана после прекращения действия электрического поля.

В [67] предложен способ изменения физико-химических свойств жидких углеводородных топлив слабым переменным электрическим полем, заключающийся в размещении топлива между электродами, на которые подают электрический потенциал, отличающийся тем, что параметры переменного электрического поля и масса молекулы углеводорода, входящего в состав углеводородного топлива и подвергающегося деструкции, устанавливают в соответствии с эмпирическим соотношением

$$\frac{f}{E} = \frac{2 \pi R l \sigma m_t}{M I t},$$

где f - частота колебания электрического поля, $1/c$;

E - амплитуда напряженности электрического поля, B/m ;

m_n - масса нуклона, $кг$;

R - радиус срединной окружности межэлектродного зазора, m ;

l - длина электродов, m ;

σ - удельная электропроводность топлива, $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$;

I - ток смещения в камере обработки, A ;

M - масса молекулы углеводорода подвергающегося деструкции, $кг$;

t - время прохождения топлива через камеру обработки, c .

При этом углеводородное топливо можно обрабатывать переменным электрическим полем как в его неподвижном состоянии, так и в процессе движения топлива через зону обработки.

Массу топлива в зоне обработки определяют в соответствии с соотношением $m=(V_k-V_э) \cdot \rho$, где m - масса топлива в зоне обработки, $кг$; V_k - объем зоны обработки, $м^3$; $V_э$ - суммарный объем электродов, размещенных внутри зоны обработки, $м^3$; ρ - плотность углеводородного топлива, $кг/м^3$.

Устройство, реализующее способ [67], содержит корпус с входным и выходным отверстиями, снабженный электродами для воздействия электрическим полем на поток топлива в камере обработки, подключенными к

источнику питания. При этом корпус является одним из электродов, а другой внутренний электрод, размещенный в камере обработки, расположен коаксиально корпусу. Источник питания выполнен в виде генератора переменного напряжения. При этом внутренний электрод выполнен пустотелым и внутри него коаксиально размещен дополнительный электрод, электрически соединенный с корпусом.

В другом известном способе обработки переменным слабым электрическим полем углеводородного топлива [59] поток топлива пропускают через участок топливопровода, в котором установлены наружный и внутренний коаксиальные электроды, на которые от электрического генератора подают переменное напряжение с переменной частотой. Между электродами благодаря движущемуся между ними потоку углеводородного топлива возникает подвижное переменное электромагнитное поле, под действием которого топливо дополнительно энергетизируется и дробится на мелкие фракции. При этом параметры электромагнитного воздействия на топливо устанавливаются в соответствии с установленным экспериментально соотношением и определенными числовыми значениями. Такое топливо, по утверждению авторов [59], позволяет увеличить экономичность двигателя на 15 - 20% и снизить выбросы СО и других остаточных фракций за счет более полного сгорания смеси. При этом параметры электромагнитного воздействия выбирают в соответствии с соотношением $L/D^2 = K_m/U \cdot f^2$, где L и D соответственно длина и диаметр участка топливопровода, на котором топливо подвергают воздействию переменного электрического поля; U - напряжение, подводимое на электроды; f частота электрического напряжения на электродах; K_m - коэффициент качества топлива, характеризующийся его вязкостью и электропроводностью. Эти параметры устанавливают путем соблюдения следующих значений: $L = 1200-1600$ мм; $D = 7,5-10,0$ мм; $U = 12- 600$ В; $f = 10-100$ Гц; $K_m = 0,8-1,0$.

Все рассмотренные выше способы и устройства предусматривают подготовку углеводородного топлива перед его подачей в форсунку.

Анализ библиографических источников и известных патентов подтвердил эффективность использования вихревых смесителей топлива. Они реализуют принцип вихревого смешивания топлива и воздуха во впускном тракте двигателя.

Одним из путей улучшения параметров топливно-воздушной смеси является использование сильных резко неоднородных электрических полей при распылении топлива форсунками.

Известны топливные форсунки для подачи распыленных капелек жидкого топлива к камере сгорания в газотурбинном двигателе с использованием сильных резко неоднородных электрических полей [71].

Камера сгорания для газотурбинного двигателя [71] содержит горелку, завихритель, предкамеру и основную камеру сгорания. Завихритель включает в себя несколько лопаток, образующих промежуточные каналы, которые заполняются сжатым воздухом. Форсунки могут работать в двух разных режимах, зависящих от режима нагрузки. При повышенной нагрузке давление подачи и, вследствие этого, скорость потока топлива через форсунку является достаточно высокими для достижения хорошего распыления топлива при отсутствии высокого электрического напряжения на ее электродах. Однако при пониженной нагрузке скорость потока топлива уменьшается, и, вследствие этого, распыление ослабевает. В этом режиме на электроды форсунки подается высокое напряжение, что приводит к улучшенному распылению топлива.

Жидкое топливо подается в камеру закрутки через множество пазов и выбрасывается через суженную часть и канал усеченно-конической формы в направлении к выпускному отверстию. Вследствие сильного вихревого перемещения топлива в камере закрутки закрученное топливо удерживается возле внутренней поверхности канала и распыляется на мелкие капли. Далее эти мелкие капли попадают в струю воздуха.

Для создания резко неоднородного поля в [71] использован полый металлический электрод с острым краем, который продолжается в направлении течения топлива через форсунку. Этот электрод располагается максимально

близко к выходному соплу форсунки и отделен изолирующими слоями от остальных деталей форсунки.

Топливу сообщается электрический заряд в точке, где закрученная струя топлива, которая придерживается внутренней стенки канала, начинает разбиваться и из форсунки выходят уже заряженные капли топлива. Высокое напряжение к заостренному электроду от высоковольтного усилителя подводится с помощью круглого высоковольтного провода [71].

В [71] отмечается, что электростатическая зарядка топлива является, главным образом, существенной (целесообразной), когда газотурбинный двигатель работает при пониженных нагрузках, то есть когда меньше топлива подается к форсункам. Такая зарядка топлива помогает контролировать распыление и испарение топлива и повышает интенсивность его сгорания. Напротив, возможно не понадобится применять электростатическую зарядку топлива, когда двигатель работает при полной нагрузке.

Недостатком топливной форсунки [71] является сложность ее конструкции и дорогостоящая для производства. К тому же объем, занимаемый форсункой, довольно большой, особенно в осевом направлении.

В форсунке [22] для подачи распыленного жидкого топлива в газотурбинный двигатель эти недостатки уменьшены. В форсунке [22] электрод для создания резко неоднородного поля и сообщения электрического заряда топливу представляет собой плоский электропроводящий элемент с отверстием, причем край отверстия является острым. Первый и второй изолирующие элементы, располагают на соответственных сторонах плоскости электропроводящего элемента, причем первый изолирующий элемент располагается на выпускной стороне форсунки. Форсунка [22] содержит и завихритель для подачи завихряющегося потока жидкого топлива к выходному отверстию. При этом ось, относительно которой топливо завихряется внутри отверстия, обычно перпендикулярна плоскости электрода. При подаче высокого напряжения на электроды сообщается заряд завихряющемуся потоку жидкого

топлива внутри отверстия так, что на выходе форсунки имеем заряженные капельки распыленного топлива.

В форсунке [22] может быть использован как радиальный, так и аксиальный завихритель углеводородного.

Накопленный к настоящему времени обширный экспериментальный материал, относящийся к изучению влияния физических полей на свойства жидкостей не получил до сих пор полного теоретического истолкования. Это в полной мере касается влияния электрического поля на углеводородные топлива. В работе И.Л.Герловина [79] рассматривается серия экспериментов по определению изменения физических характеристик различных видов углеводородного топлива при воздействии на них постоянным электрическим полем, создаваемым при разности потенциалов на электродах от 6 до 50 кВ. Результаты этих экспериментов показали, что испаряемость обработанного топлива выше, чем необработанного. Изменение температуры вспышки при обработке топлива показано на рисунке 1.2. По оси абсцисс отложены номера опытов (опыты проводились на газотурбинном топливе), по оси ординат показано изменение температуры вспышки. Среднее значение составило $t_{всп}^{исх} = 100,4 \pm 1,5$ °С. Это значение было принято в качестве эталона сравнения. Температура вспышки обработанного топлива снижалась.

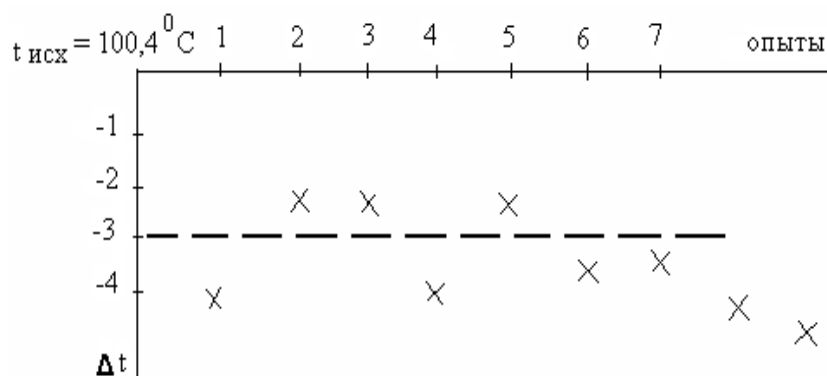


Рисунок 1.2 – Изменение температуры вспышки топлива при обработке постоянным электрическим полем

На основании проведенных исследований была установлена принципиальная возможность улучшения некоторых эксплуатационных характеристик топлива путем воздействия на него постоянным электрическим полем. В частности, снижение поверхностного натяжения топлива, повышение испаряемости может оказать положительное влияние на процесс распыления топлива в цилиндре двигателя и увеличения теплоты сгорания топлива, что в конечном итоге может привести к уменьшению удельного расхода топлива. На рисунке 1.3 показан прирост теплоты сгорания дизельного топлива после его обработки электрическим полем. Также приведен доверительный интервал значений теплоты сгорания необработанного топлива, равный 3σ . Как следует из графика, все полученные значения теплоты сгорания лежат значительно выше величины утроенного доверительного интервала, что дает основание рассматривать эти опыты как достоверные. Средний прирост теплоты сгорания составил 10%.



Рисунок 1.3 – Прирост теплоты сгорания дизельного топлива, обработанного постоянным электрическим полем

Применительно к карбюраторным двигателям внутреннего сгорания в [48] отмечается, что использование электрических воздействий на топливо может интенсифицировать зажигание обедненных смесей, снизить токсичность отработавших газов (ОГ), обеспечить улучшение однородности и реакционной

способности топливовоздушной смеси за счет более тонкого распыливания топлива. При этом это достигается не за счет увеличения аэродинамических воздействий, а путем снижения величины поверхностного натяжения топлива электрическим воздействием на топливо.

Анализ состояния проблемы воздействие электрических и магнитных полей на топливо приведен в [80, 146].

В [81-92] исследовалось истечение различных диэлектрических жидкостей, в том числе углеводородных топлив при приложении к ним электрические поля различной напряженности E и вида. В результате этих исследований было выявлено, что наложение электрического поля повышенной напряженности E вызывает сообщение потоку жидкости униполярного электрического заряда.

В случае свободного истечения топлива при этом, в результате взаимного отталкивания топлива при выходе его из сопла происходило резкое увеличение угла раскрытия струи от 0^0 при потенциале $U = 0$, до 100^0 при $U = 10$ кВ [92]. Кроме этого, имело место увеличение скорости истечения жидкостей. Так, при воздействии на дизельное топливо высокого напряжения постоянного тока $U = 10$ кВ скорость его истечения увеличилась на 20%. Увеличение скорости истечения наблюдалось и при наложении переменного электрического поля, но в меньшей мере [93]. Подобный эффект при наложении электрического поля высокой напряженности отмечался в работах [93] и [95].

Значительное изменение режима истечения (увеличение числа капель и уменьшение их размеров) в результате наложения на топливо электрического поля высокой напряженности E было получено в работах [92] и [96]. Авторы этих работ наблюдаемый эффект объясняют снижением поверхностного натяжения топлива вследствие его электризации. Так, по данным [97] при напряженности электрического поля $E = 2$ кВ/см поверхностное натяжение топлива снизилось на 22%. Приведенные в [98] результаты экспериментов также подтверждают снижение поверхностного натяжения под действием приложенного электрического поля.

Положительное влияние электрической обработки топлива на некоторые его характеристики отмечается в работах [99] и [100], где в условиях безмоторных установок было получено снижение температуры и периода задержки воспламенения топлива при его электризации. Электрическое поле также оказывает положительное действие и на испаряемость топлива [100,101,95,102]. В работе [95] в статических условиях исследовалась скорость испарения топлива, предварительно обработанного электрическим полем. В результате установлено, что скорость испарения наэлектризованного топлива значительно выше, чем необработанного. При этом наибольшая разница в скорости испарения наблюдается в первые 5 минут и составляет 20%. С увеличением времени испарения эта разница постепенно уменьшается и через 200 минут практически исчезает.

Положительный эффект увеличения скорости испарения различных жидкостей, в том числе и топлива, но уже в условиях непосредственно наложенного электрического поля как в статических условиях, так и при испарении в воздушный поток, отмечается в работах [94], [101]. При этом наибольший эффект достигается при наложении переменного поля. Объясняют это авторы тем, что переменное поле в результате усиления колебаний паровоздушного слоя, который непосредственно примыкает к поверхности испаряющейся жидкости и является основным сопротивлением испарению, будет способствовать его разрушению.

В этом же направлении проведена работа [100], где также исследовался процесс испарения с неподвижной поверхности и в динамическом режиме (при наличии относительного движения между газовой средой и поверхностью испарения жидкости).

Как показали опыты по испарению в неподвижный воздух, наложение электрического поля существенно увеличивает скорость испарения топлива. Аналогичные результаты были получены Акбаровым и при динамическом испарении свободно падающих наэлектризованных капель в нагретой среде, что уже более близко соответствует условиям работы авиационных двигателей.

Эффект увеличения скорости испарения капель топлива, несущих на себе электрический заряд, автор объясняет увеличением теплопритока от воздушной среды к капле под действием электрического поля (при условии положительного градиента температуры между каплей топлива и воздушной средой).

Об усилении конвективного теплообмена в жидкостях и газах под действием электрического поля также отмечается в работах [103 - 105]. Авторы этих работ считают, что одной из возможных причин интенсификации теплообмена является возникновение электрического ветра в результате движения заряженных частиц под действием электрического поля. При этом отмечается, что степень влияния электрического поля на условия теплообмена зависит не только от электрических свойств молекул жидкости и градиента температур в объеме, но и от типа поля, его однородности и напряженности.

В [103] проведены сравнительные исследования по влиянию постоянного и переменного электрических полей на конвективный теплообмен в трансформаторном масле. Авторы отмечают, что при E до 312 кВ/см эффективнее постоянное поле. С дальнейшим повышением напряженности лучшие результаты дает переменное поле: так отношение коэффициентов теплоотдачи с полем и без поля $\alpha_E / \alpha_0 = 5$ достигается при переменном напряжении, равном 17 кВ, а при постоянном около 23 кВ.

Положительное влияние электрической обработки топлива на процесс его сгорания получено в опытах [92], выполненных на открытом турбулентном пламени. Как отмечают авторы, в результате подведения высокого напряжения к распылителю горелки происходила значительная интенсификация процесса горения, что выражалось в увеличении температуры пламени, полноты и скорости сгорания топлива, концентрации ионов в пламени, а также в некоторых видимых изменениях формы, структуры, стабилизации пламени и уменьшении копоти пламени. Основной и решающей причиной интенсификации процесса сгорания эти авторы считают электризацию сжигаемого топлива, обеспечивающую улучшение и ускорение подготовки горючей смеси за счет более тонкого

диспергирования и более быстрого испарения капель, а также инициирующего воздействия ионизированных молекул топлива на протекание окислительных реакций.

Это предположение подтверждается дальнейшими опытами [92], где в условиях безмоторной установки было зарегистрировано заметное снижение температуры появления холодного пламени для бензина, керосина и дизельного топлива при их электризации. Это обстоятельство свидетельствует о более интенсивном протекании окислительных реакций низкотемпературного воспламенения вследствие активизирующего воздействия ионизированных молекул топлива на кинетику предпламенных реакций.

Конечный результат от электрической обработки топлива существенным образом зависит от способа организации электрического поля. Этот вывод вытекает из работы [93], где показано, что обработка жидких топлив электрическим полем, образованным плоскими электродами (однородное поле), не влияет на скорость сгорания, в то же время обработка топлива в неоднородном поле приводит к заметному увеличению скорости сгорания топлива.

Электрическая обработка топливовоздушной смеси. Согласно литературным данным [146] возможны следующие виды обработки топливовоздушной смеси: магнитным полем [106], электростатическим [107] и в поле коронного разряда [108,92,106]. Из перечисленных видов обработки наиболее широко используется коронный разряд, который образуется вокруг проводника, помещенного в потоке топливовоздушной смеси при подаче на него высокого напряжения. В [92] отмечается, что при обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда происходит как электризация топлива, так и ионизация воздуха с образованием озона O_3 , т.е. образуется значительное количество активных частиц, которые легко вступают в реакцию с исходными или промежуточными продуктами без какой-либо значительной активации, а это, как уже отмечалось выше, способствует интенсификации процесса зажигания и сгорания, что, в конечном итоге, должно привести к улучшению показателей рабочего процесса двигателя.

Подтверждением сказанному является ряд работ [109, 107, 110, 106], в которых получено положительное влияние предварительной ионизации топливовоздушной смеси на параметры процесса сгорания и выходные показатели двигателя. Так в [107] в условиях реального двигателя внутреннего сгорания в результате приложения высокого напряжения на электрод, размещенный внутри камеры сгорания, получено (как утверждают авторы) значительное (в 1,5 раза) увеличение эффективной мощности двигателя. При этом напряжение подавалось на электрод в течение процессов наполнения и сжатия и составляло 10 кВ. Этот прирост мощности автор объясняет за счет увеличения количества ионов в горючей смеси, которые облегчают условия воспламенения горючей смеси и приводят к возрастанию скорости ее горения. Аналогичный прирост мощности, но значительно меньший (на 6...7%), был получен в [106] в результате применения специальной "ионосвечи", которая обеспечивала предварительную ионизацию топливовоздушной смеси непосредственно в области искрового промежутка. Малым объемом ионизации смеси, оказывающим влияние в первую очередь на условия зажигания, по-видимому, можно объяснить меньший прирост мощности по сравнению с вышеуказанными опытами.

Положительное влияние предварительной ионизации смеси в зоне искрового промежутка на величину и разброс пробивных напряжений U_{np} отмечается в работах [111,112]. В [113] получено значительное снижение температуры зажигания метано-воздушной смеси в результате пропуска одного из компонентов смеси через электрический разряд непосредственно перед смешением с другим компонентом. Авторы делают заключение, что действие искры создает некоторый активный носитель (электрически заряженные ионы), который, попадая в поток метана, делает последний более легко воспламенимым.

Результаты опытов, приведенные в [114] и [115] также свидетельствуют о расширении области самовоспламенения газозвушной смеси при дополнительной ее ионизации в результате пропуска через искровой разряд или присадки атомов кислорода.

Известно, что проблема повышения экономичности и снижения токсичности ОГ в ДВС в значительной степени может быть решена за счет сжигания в двигателях обедненных смесей [146]. Однако, этому препятствует ухудшение условий воспламенения, что приводит к неустойчивой работе двигателя и к пропускам зажигания. В работе [116] отмечается, что в результате предварительной ионизации топливовоздушной смеси специальными ионизаторами, установленными в камере сгорания, удалось расширить предел устойчивой работы двигателя до $\alpha_{\text{ПРЕД}} = 2$.

Значительный эффект от предварительной обработки однородной топливовоздушной смеси в поле коронного разряда был получен в [92, 75], где было зарегистрировано значительное уменьшение дымления, увеличение полноты сгорания, сокращение длительности начальной фазы сгорания и увеличение скорости распространения фронта пламени $U_{\text{пл}}$. Так, для бензина А-72 наблюдалось увеличение $U_{\text{пл}}$ с 8,7 до 20 м/с; для А-66 с 10,7 до 37,5 м/с и для бензина А-95 с 16,9 до 18,4 м/с. Позднее в этом же направлении были проведены опыты другими авторами [109,95], которые получили аналогичный эффект увеличения скорости сгорания топливовоздушной смеси в результате ее электрической обработки электрическими полями высокой напряженности. Увеличение $U_{\text{пл}}$ авторы работы [92] объясняют образованием значительного количества активных частиц в горючей смеси, в том числе и озона, что приводит к повышению ее реакционной способности, а, следовательно, и к возрастанию скорости химической реакции. Косвенным доказательством положительной роли ионизации топливовоздушной смеси на процесс сгорания могут служить результаты исследования [147,149,121,148], в которых улучшение условий воспламенения достигалось увеличением содержания активных частиц в смеси путем присадки к ней химически активного озона и кислорода.

Ионизация и озонирование воздуха, поступающего в двигатель. Как уже ранее отмечалось, при электрической обработке топливовоздушной смеси в поле коронного разряда в результате ее ионизации происходит образование значительного количества активных частиц, в том числе и озона O_3 , являющегося

сильным окислителем. Из теории теплового взрыва следует, что вещества, ускоряющие медленную реакцию окисления углеводородов, "активаторы", должны также изменять условия воспламенения [117,118]. Эти изменения должны заключаться в уменьшении периода задержки воспламенения и снижении температуры воспламенения. Действие таких "активаторов", по-видимому, главным образом, заключается в облегчении образования начальных активных центров цепной реакции. Применение озона как одного из активаторов в процессах медленного окисления исследовалось в ряде работ. Как было обнаружено в [119], при окислении метана действие озона проявляется в условиях, когда в результате диссоциации O_3 образуется атомарный кислород, что заметно наблюдается при температуре выше $1000^{\circ}C$. Однако, как показано в [120], уже при $300^{\circ}C$ озон непосредственно взаимодействует с углеводородами.

В работе [121] исследовалось влияние озона на воспламенение газообразных смесей некоторых углеводородов с кислородом. Исследования проводились в реакционном сосуде путем частичной замены кислорода озоном с таким расчетом, чтобы общее количество атомов кислорода в смеси оставалось постоянным. В результате оказалось, что озон сокращает период задержки воспламенения. Величина эффекта возрастает с увеличением содержания O_3 в смеси и понижением температуры. Так, при температуре порядка $500^{\circ}C$ действие его невелико. Такое же действие озона, но уже на жидкое (дизельное) топливо, было получено в опытах, изложенных в [122], при пропускании озона через топливо, где происходило его растворение. При этом было зарегистрировано снижение температуры самовоспламенения и повышение полноты сгорания топлива. Наблюдаемый эффект авторы объясняют двумя причинами. Во-первых, озон, растворяясь в топливе, частично реагирует с его молекулами, образуя при этом нестойкие соединения и свободные валентности (радикалы). Пары такого топлива уже с момента их образования содержат значительное количество активных центров, что способствует интенсивному ускорению цепной реакции самовоспламенения при более низких температурах. Во-вторых, озон, не вступивший в реакцию с молекулами топлива при его растворении, выделяется в

дальнейшем при испарении топлива и разлагается под действием высокой температуры с образованием атомарного кислорода. Так как атомарный кислород гораздо активнее молекулярного, то первоначальные активные центры образуются с большей скоростью и при более низких температурах. Об этом свидетельствует и анализ газов, который в отсутствие горения показал, что топливо, обработанное озоном, частично окисляется (концентрация $CO = 2\%$), в то время как у обычного топлива $CO=0\%$.

Этими же авторами были проведены моторные исследования на дизеле [149], где в результате подмешивания O_3 к воздуху, поступающему в двигатель, было получено уменьшение периода задержки воспламенения на 25%. Авторы объясняют это химическим фактором и отмечают при этом, что эффект от присадки O_3 может быть получен при условии, если между обработкой топлива озоном и его сжиганием в двигателе пройдет не более двух-трех часов. Авторы считают, что за более длительное время озон успевает прореагировать с топливом, образовав при этом кислородосодержащие соединения, играющие незначительную роль в химических реакциях воспламенения.

По данным [123] и [121], присадка O_3 к топливовоздушной смеси приводит к снижению энергии активаций. Так, для бутановоздушной смеси без присадки O_3 энергия активации составляет 44 ккал/моль, при добавке озона в количестве 2,5 - 30 ккал/моль, а добавка 7,4% O_3 к указанной смеси уже приводит к отсутствию задержки воспламенения.

В условиях реального двигателя электрическая активация воздуха, поступающего в двигатель, т.е. увеличение в нем доли химически активных частиц может быть обеспечено различными способами. Так, в [124 - 126] для обогащения воздуха озоном предлагается использовать тлеющий электрический разряд, а в [127] для обогащения воздуха кислородом - магнитный способ. Последний основан на парамагнитных свойствах кислорода и диамагнитных свойствах азота. В устройствах этого типа вследствие отталкивания молекул азота и притяжения молекул кислорода постоянными магнитами, установленными по

ходу воздушного потока, центральная струя его будет обогащаться кислородом, а обедненный воздух отводится наружу в атмосферу.

В ряде патентов [128 - 133] предлагается озонирование воздуха, поступающего в двигатель внутреннего сгорания, осуществлять в устройствах-озонаторах, размещаемых в корпусе воздушного фильтра или в других местах впускной системы. В качестве источников питающего напряжения могут быть использованы источники переменного или импульсного напряжения величиной до 10-20 кВ, Производительность озона в подобных устройствах составляет около 1,0 г O₃ в минуту на 1 м³ воздуха, входящего в двигатель, и считается достаточной для обеспечения хорошего качества процесса сгорания.

Для ионизации воздуха, поступающего в двигатель с целью улучшения процесса сгорания, некоторые авторы предлагают использовать искровой разряд. Так, в [134] предлагается использовать полость под крышкой прерывателя-распределителя системы зажигания, где происходит ионизация воздуха под действием искровых разрядов. Далее ионизированный воздух за счет разрежения в диффузоре по токонепроводящему газопроводу поступает в диффузор карбюратора и ионизирует основной входящий поток воздуха. Аналогичный вариант, но с размещением искровых промежутков непосредственно во впускной системе двигателя, связанных с системой зажигания, предлагается в [135].

Возможность применения подобных устройств подтверждается опытами [95], где в результате предварительной ионизации воздуха искровым разрядом от индукционной катушки зажигания с последующим сжиганием в нем топлива было получено увеличение скорости его сгорания на 25...30%. При этом авторы отмечают, что наблюдаемый эффект в значительной степени будет определяться влажностью воздуха. Такое же действие искрового разряда на условия воспламенения газозвушных смесей было получено в уже ранее упоминавшихся работах и [114].

Также возможна ионизация воздуха, поступающего в двигатель, за счет использования коронного разряда.

Таким образом, приведенные данные позволяют предполагать, что ионизация и озонирование воздуха, поступающего в двигатель, может оказать заметное влияние на условия воспламенения и сгорания топливоздушнoй смеси, главным образом, вследствие увеличения относительной доли образования активных центров химической реакции.

Влияние электрического заряда на параметры процесса смесеобразования [146]. До сих пор речь шла, в основном, о влиянии электрической обработки топлива и топливоздушнoй смеси на процесс их сгорания, исходя из химического фактора. Кроме того, при всех видах электрической обработки (ионизации воздуха, электризации топлива и обработки топливоздушнoй смеси) помимо ионизации, приводящей к увеличению концентрации активных частиц в смеси, оказывающих влияние на условия воспламенения и сгорания, будет происходить и электризация капель распыленного топлива, т.е. образование на них электрических зарядов. В этом случае на каплях, кроме молекулярных сил, направленных внутрь и определяющих поверхностное натяжение или, другими словами, прочность капли, будут иметь место и электрические силы, направленные в противоположную сторону и уменьшающие прочность капли [150,92]. Вследствие этого, закономерности поведения заряженных капель в ряде процессов будут отличными от незаряженных.

Первые попытки в направлении улучшения тонкости и однородности распыливания жидкостей и, в частности, топлив за счет их электризации были предприняты в ряде отечественных [100,108,136,92] и зарубежных исследований [153]. К сожалению, все эти исследования, кроме опытов Ревзина [94, 136], были поставлены в условиях безмоторных установок, далеко не соответствующих условиям впускной системы реального двигателя. К тому же полученные данные по влиянию электрического поля на поверхностное натяжение топлива противоречивы [98,97,92] (начиная с некоторого значения напряженности электрического поля) и практически несопоставимы из-за разных способов

наложения электрического поля и методик измерения величины поверхностного натяжения.

В работах [108,136] исследовалось влияние электрической обработки топливозвоздушной смеси в поле коронного разряда на процесс смесеобразования в условиях близких к реальному двигателю. В результате было зарегистрировано уменьшение выпадания топлива в пленку на 27% и уменьшение степени неравномерности распределения смеси по отдельным ветвям впускного трубопровода на 9%. Полученный эффект автор объясняет снижением поверхностного натяжения бензина в результате электризации капель топлива, что приводит к уменьшению сил сцепления между молекулами топлива и, следовательно, к улучшению тонкости его распиливания.

Данные безмоторных исследований хорошо согласуются с его опытом, проведенным на полноразмерном автомобильном двигателе УАЗ-451 [108], где в результате электрической обработки горючей смеси в поле коронного разряда было отмечено снижение концентрации СО в отработавших газах на некоторых режимах его работы.

Воздействие электрического поля на пламя [146]. Началом работ в направлении использования электрических воздействий в двигателях для улучшения показателей их работы послужило установление собственных электрических свойств пламени, т.е. электропроводности пламени, которые впервые были исследованы Джильбертом в 1600 году и продолжены Аррениусом в 1890...1891 годах [106]. Эти исследования натолкнули на мысль, что применяя различные варианты наложения электрических и электромагнитных полей на зону горения в двигателе, можно, воздействуя на заряженные электрические частицы в пламени, носителями которых являются ионы, регулировать скорость процесса горения как в целом, так и на отдельных его стадиях, и тем самым, получить параметры процесса сгорания близкие к оптимальным [153 , 137, 138].

Положительное влияние электрического поля на процесс горения наблюдался в работах [111, 137] и, в дальнейшем, рядом других авторов [93, 139, 140, 141, 136, 92, 104, 108, 138], которые указывают, что независимо от механизма

влияния электрического поля на процесс горения топлива, сам факт этого влияния является бесспорным.

Задача практического использования электрического поля с целью интенсификации процесса горения заключается в выявлении наиболее эффективных путей его воздействия в различного рода устройствах, использующих жидкие и газообразные виды топлив, в получении необходимых закономерностей и в разработке конструкций соответствующих устройств.

Однако здесь не существует единого мнения об эффективности воздействия электрических полей на пламя. Если авторы вышеупомянутых работ утверждают, что, воздействуя электрическим полем на пламя, можно значительно интенсифицировать процесс горения, то Даггер, Симон и Герстейн [142] считают, что электрические поля в незначительной степени оказывают влияние на горение топлива. Результаты более позднего периода (по отношению к [142]), выполненные в [93,106,92,104,140], однозначно свидетельствуют о положительном влиянии электрических полей на процесс сгорания, что в условиях открытого пламени выражается в изменении его структуры, конфигурации и скорости выгорания топлива [93,92,106,108], а в условиях безмоторных установок - в увеличении скорости распространения фронта пламени [140,92].

Следует отметить, что до настоящего времени нет единого объяснения механизма влияния электрического поля на пламя. Одни исследователи [143] объясняют это газодинамическим воздействием, т.е. образованием электрического ветра, причиной которого является ускоренное движение положительных ионов в сторону отрицательного потенциала, другие [144] предполагают, что электрическое поле влияет на концентрацию заряженных частиц в зоне горения, которые, в свою очередь, интенсифицируют химические реакции горения. По мнению Салимова [145], имеющиеся противоречия о влиянии электрического поля на пламя во многом объясняются различной методикой проведения экспериментов, а разное объяснение механизма действия электрического поля - неучетом некоторых физико-химических явлений,

имеющих место в предпламенной зоне, и, в частности, наличием избыточной ионизации газовоздушной смеси. Последнее обстоятельство способствует интенсификации процесса горения вследствие присутствия дополнительных ионов, которые, как считают авторы [100,145], играют роль свободных ион-радикалов с избыточным зарядом, обеспечивающих более интенсивное протекание окислительных реакций в свежих слоях смеси.

Если все это так, то регулируя концентрацию ионов, например, ионизацией топливовоздушной смеси или электризацией топлива при его распыливании, можно регулировать, в определенном смысле этого слова, и развитие процесса горения. Это предположение подтверждается опытами [92], [104], проведенными на открытом турбулентном пламени, где при сжигании распыливаемых жидких топлив в результате подведения высокого напряжения к распылителю горелки процесс горения значительно интенсифицировался. Основной причиной наблюдаемого эффекта авторы считают электризацию сжигаемого топлива, которая помимо увеличения концентрации ионов в предпламенной зоне способствует получению более высокой степени дисперсности среды, что также является одной из причин интенсификации процесса горения.

Необходимо заметить, что степень воздействия внешнего электрического поля на пламя, кроме его характеристик (вида поля, его направления и величины), также зависит и от начальной скорости распространения пламени. Если на спокойном пламени эффект воздействия внешнего поля ярко выражен как внешне (в изменении формы пламени), так и внутренне (в увеличении скорости сгорания), то с увеличением начальной скорости сгорания эффект резко уменьшается.

1.2 Аналитический обзор современной научно-технической литературы по влиянию электрического заряда капель топлива на процессы их горения

В ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» на протяжении последних 35 лет ведутся успешные

работы по использованию электрических полей для управления заряженными и незаряженными объемами, потоками и струями диэлектрических рабочих жидкостей и газов электрогидравлических и электропневматических систем управления [81 – 91]. Сформирована эффективная ведущая научная школа Российской Федерации. Характерной особенностью созданных научной школой инновационных электрокаплеструйных устройства и электрокаплеструйных технологий является конкурентоспособность как на отечественном, так и зарубежных рынках. Они широко внедрены в различные отрасли промышленности (применительно к процессам маркировки, нанесения покрытий и другим) в различных странах мира: России, США, Германии, ФРГ, Италии, Голландии, Венгрии, Чехии, Турции, Китае, Тайване, Южной Корее, Иране, Монголии, странах СНГ, Балтии, Южной Америки. Мировая новизна разработанных методов непосредственного преобразования рода энергии сигналов, их аппаратного обеспечения, электрокаплеструйных устройств и технологий подтверждена более 120 патентами РФ, США, Японии, Великобритании, ФРГ, Франции, Швеции и авторскими свидетельствами СССР на изобретения. Накоплен уникальный теоретический и практический опыт по методам управляемого (в том числе от микроЭВМ) сообщения электрического заряда каплям, струям и потокам рабочих сред, который положен в основу выполнения данной работы. Причем методы сообщения электрического заряда потокам, струям диэлектрической жидкости и каплям могут быть разными: электрогидродинамический в резко неоднородном поле, электрогазодинамический в поле коронного разряда, индукционный, электрокинетический [88 – 91, 81 – 87, 163 – 167].

1.2.1 Исследование электрогидродинамического способа сообщения униполярного электрического заряда потокам и струям углеводородных топлив

Данный способ сообщения электрического заряда потокам и струям углеводородных топлив основан на создании резко неоднородного электрического поля непосредственно в потоке углеводородного топлива. Он, прежде всего, был впервые разработан для управления заряженными потоками и струями диэлектрической жидкости [91, 88], однако основные полученные результаты могут успешно быть применены и к сообщению заряда углеводородным топливам, так как последние, как правило, представляют собой диэлектрические жидкости.

С целью увеличения объемной плотности электрического заряда, заряжающие электроды типа «игла – сопло» размещены непосредственно в потоке углеводородного топлива – в сопле, формирующем струю углеводородного топлива, так, чтобы электрическое поле было направлено по направлению движения струи углеводородного топлива.

При реализации данного способа создания электрического заряда углеводородное топливо, подаваемое топливным насосом, поступает в трубопровод из диэлектрика, заканчивающийся диэлектрическим коническим насадком, формирующим струю диэлектрического топлива. Один из заряжающих электродов представляет собой иглу, размещенную непосредственно в потоке углеводородного топлива и укрепленную перед формирующим насадком в центре металлической крестовины так, чтобы он располагался по оси движения потока углеводородного топлива. Через крестовину подводится высокое напряжение к игольчатому электроду. Другой электрод представляет собой металлическую шайбу, закрепленную на выходе диэлектрического насадка.

При подаче высокого напряжения на электроды узла электризации углеводородного топлива между ними возникает разряд типа коронного, при этом возникает униполярный поток ионов знака потенциала острия. Униполярные ионы двигаются в углеводородном топливе в электрическом поле зарядных электродов по направлению потока и захватываются вытекающей струей углеводородного топлива.

Исследования показали, что объемная плотность электрического заряда в вытекающей из сопла струе углеводородного топлива составляет порядка $\rho_e = 10^{-2} \text{ Кл/м}^3$, что существенно больше, чем при электризации углеводородных топлив электрокинетическим способом.

При сообщении, таким образом, электрического заряд углеводородным топливам необходимо иметь ввиду, что вследствие конечной проводимости σ углеводородных топлив и подвижности b ионов в углеводородном топливе плотность объемного электрического заряда в вытекающей струе углеводородного топлива несколько изменяется и, строго говоря, не будет постоянной по длине струй. Это обстоятельство следует учитывать, если в дальнейшем таким образом заряженную струю топлива необходимо дробить на капли.

Хотя удельная проводимость σ углеводородных топлив низка (порядка $10^{-14} - 10^{-11} \text{ 1/(Ом} \cdot \text{м)}$), но при $\sigma \neq 0$ заряд по длине струи постепенно нейтрализуется за счет электронной проводимости, что приводит к снижению ρ_e . Коэффициент подвижности ионов b в диэлектрических углеводородных топливах составляет $b \approx 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, что на четыре порядка ниже, чем в воздухе при рассмотрении способа сообщения электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле коронного разряда. Если же будем дозаряжать каплю (струю) топлива в поперечном поле коронного разряда, то может оказаться, что вследствие конечной подвижности ионов в углеводородном топливе под действием поперечного поля напряженностью E у зарядов появляется поперечная составляющая скорости bE и часть зарядов может уйти за границу струи (капли).

Предположим, что σ и b постоянны и не зависят от величины напряженности поля E , причем $bE \ll v$, где v – средняя скорость струи углеводородного топлива. Тогда в одномерном приближении получено

выражение (1.1) для распределения плотности объемного электрического заряда по длине струи углеводородного топлива

$$\frac{\rho_e(y)}{\rho_{e0}} = \frac{\sigma \exp[-y\sigma/(\varepsilon_0 \varepsilon v_0)]/(\sigma + b \rho_{e0})}{1 - \{b \rho_{e0} \exp[-y\sigma/(\varepsilon_0 \varepsilon v_0)]/(\sigma + b \rho_{e0})\}}, \quad (1.1)$$

где ρ_{e0} – объемная плотность электрического заряда в струе углеводородного топлива на срезе формирующего насадка; y – текущая координата по длине струи (на срезе формирующего насадка $y = y_0 = 0$); $\rho_e(y)$ – объемная плотность электрического заряда на расстоянии y от срез формирующего насадка; v_0 – скорость струи углеводородного топлива на срезе формирующего насадка.

Оценим качественное влияние проводимости углеводородных топлив σ и подвижности b свободных зарядов в них на распределение ρ_e по длине струи.

При $\sigma \neq 0$ и $b = 0$ из (1.1) имеем

$$\rho_e(y) = \rho_{e0} \exp[-y\sigma/(\varepsilon \varepsilon_0 v_0)].$$

При $\sigma = 0$ и $b \neq 0$ можно считать, что роль проводимости играет эквивалентная проводимость $\rho_{e0} b$. Тогда

$$\rho_e(y) = \frac{\rho_{e0}}{1 + [y \rho_{e0} b / (\varepsilon \varepsilon_0 v_0)]}. \quad (1.2)$$

Следовательно, плотность объемного заряда монотонно падает по длине струи углеводородного топлива и на определенном расстоянии от срез сопла будет большей в случае $\sigma = 0$ и $b \neq 0$, чем в случае $\sigma \neq 0$ и $b = 0$.

В реальных углеводородных топливах $\sigma \neq 0$ и $b \neq 0$, однако, если выбрать углеводородное топливо с малой проводимостью, например, чтобы

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon v_0}{\sigma y} \gg 10, \quad (1.3)$$

то в первом приближении распределение объемной плотности электрического заряда по длине струи можно считать соответствующим формуле (1.2).

Следовательно, для обеспечения максимальной плотности объемного электрического заряда при электрогидродинамическом методе его сообщении углеводородное топливо должно обладать малой проводимостью (соотношение (1.3) достаточно велико) и малой подвижностью b ионов в нем.

При размещении игольчатого электрода внутри формирующего струю насадка, как показали экспериментальные исследования с использованием в качестве углеводородного топлива керосина [для керосина $\sigma \approx 10^{-11} \text{ 1 / (Ом} \cdot \text{м)}$] можно получить объемную плотность электрических зарядов в струе керосина на срезе формирующего насадка

$$\rho_{e0} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^3.$$

При использовании в качестве игольчатых электродов нескольких игл (многоэлементный эмиттер) для керосина имеем объемную плотность электрических зарядов в струе керосина на срезе формирующего насадка

$$\rho_{e0} = 10^{-1} \text{ Кл/м}^3.$$

Таким образом, при электрогидродинамическом способе сообщения электрического заряда потокам и струям углеводородных топлив существенно повышается объемная плотность электрического заряда в углеводородном топливе по сравнению с электрокинетическим способом.

1.2.2 Влияние электрического заряда капель на показатели эффективности процессов воспламенения и горения углеводородных топлив

В настоящем разделе приведены основные результаты исследований [75, 92, 99, 25, 26, 87] по влиянию электрических зарядов, сообщенных каплям топлива теми или иными указанными выше способами, на показатели эффективности процессов воспламенения и горения, широко применяемых углеводородных топлив: испарение горючего, температуру воспламенения, время

задержки воспламенения, длину факела пламени, концентрационные пределы воспламенения, полноту сгорания, скорость распространения фронта пламени, стабилизацию пламени, состав отработавших газов.

Исследования показали, что чем больше электропроводность рабочих жидкостей и меньше ее поверхностное натяжение, тем лучше она диспергируется под действием электрических полей.

Влияние электрического заряда на дисперсность. Исследования показали, что чем больше электропроводность рабочей жидкости и меньше ее поверхностное натяжение, тем лучше она диспергируется под действием электрических полей.

На основании условий устойчивости капли под действием сил поверхностного натяжения и электростатических сил установлено, что электрический заряд уменьшает поверхностное натяжение капли на величину [75,92,99,38,39, 25, 27,87]

$$\Delta\alpha = \frac{q^2}{64 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^3}, \quad (1.4)$$

где $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_q$ – уменьшение коэффициента поверхностного натяжения заряженной капли, H/m ; α – коэффициент поверхностного натяжения незаряженной капли, H/m ; α_q – коэффициент поверхностного натяжения заряженной капли, H/m ; q – электрический заряд капли, $Kл$; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{m}$ – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); ε – относительная диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости; r – радиус капли, m .

В качестве примера [26] в соответствии с (1.4) на рисунке 1.4 показано влияние электрического заряда капель топлива на уменьшение их поверхностного натяжения в зависимости от диэлектрической проницаемости горючего и диаметра капель. Как видно из рисунка 1.4 имеет место уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли горючего по сравнению с

незаряженной каплей, что способствует ее разрушению под действием аэродинамических сил. Образуются более мелкие капли. Известно, что чем меньше диаметр капли горючего и чем однородней состав горючей смеси, тем эффективнее процесс воспламенения и горения углеводородных топлив и их смесей.

Условие неустойчивого равновесия заряженной капли топлива, движущейся в потоке воздуха при отсутствии внешнего электрического поля, при котором начинается ее разрушение, имеет вид (1.5)

$$\frac{\gamma_n v_{отн}^2}{2} = \frac{2\alpha}{r} - \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r^4}, \quad (1.5)$$

где $v_{отн}$ – относительная скорость воздуха по отношению к скорости заряженной капли; γ_n – поверхностная плотность капли горючего, $кг/м^2$.

Радиус наиболее крупных капель r_q , образующихся при электростатическом распыливании, определяется выражением (1.6)

$$r_q = r - \frac{q^2}{64\pi^2 \alpha \varepsilon \varepsilon_0 r^2}. \quad (1.6)$$

Как известно, на каплю можно нанести заряд не более предельного заряда q_{max} , определяемого критерием Рэля устойчивости заряженной капли рабочей жидкости

$$q \leq q_{max} = \sqrt{64\pi^2 \alpha \varepsilon_0 r^3}. \quad (1.7)$$

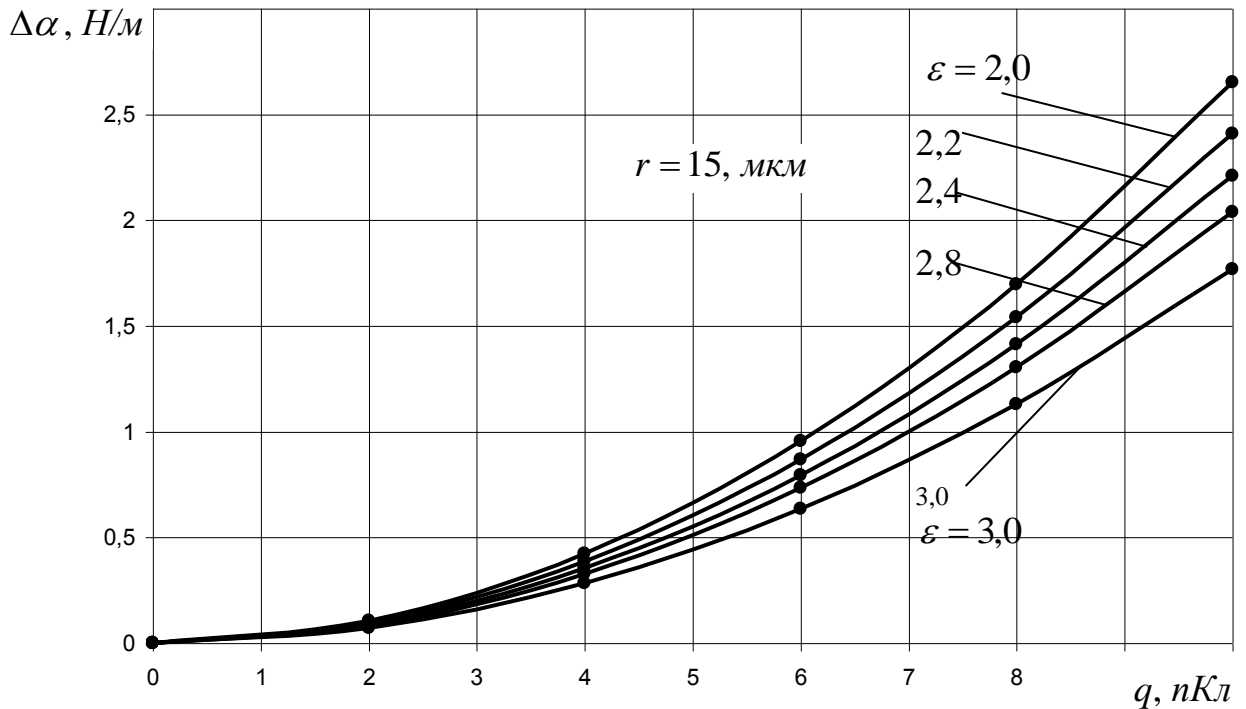


Рисунок 1.4 – Влияние электрического заряда капли жидкости и ее относительной диэлектрической проницаемости на поверхностное натяжение капли

Можно показать, что при выполнении условия (1.7) при сообщении униполярного заряда капле отношения заряда капли к массе m капли и к предельному их значению будет

$$\frac{q}{m} / \left(\frac{q}{m} \right)_{\text{пред}} = \frac{2,8 \cdot 10^4 \gamma d^{3/2}}{\alpha^{1/2} b}, \quad (1.8)$$

где $(q/m)_{\text{пред}}$ – предельное отношение заряда к массе капли; d – диаметр капли; α – коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости; γ – электропроводность топлива; b – подвижность ионов.

Из (1.8) видно, что для получения высокого отношения заряда к массе капли электропроводность топлива γ играет большую роль.

Влияние на скорость испарения заряженных капель при их обдуве потоком воздуха. Скорость испарения капель фиксировалась при установке

нескольких датчиков по длине полета капли и определении в каждом месте их диаметра.

Результаты экспериментов, полученные при обдуве встречным потоком воздуха при температуре (200-300)°С наэлектризованных капель воды и бензина А-95 показывают [25,26], что скорость испарения заряженных капель увеличивалась по сравнению с незаряженными каплями. Но увеличивалась в разной степени: если скорость испарения заряженных капель воды увеличивалась до 200%, то для заряженных капель бензина А-95 это увеличение составляет 10-30%.

Влияние на процесс воспламенения заряженных капель топлива. Определялась (см. таблицу 1.2) с использованием фотоумножителей [75, 92, 99] температура воспламенения в нагретой до 1500°С кварцевой трубе одиночных свободно падающих капель топлива одинакового диаметра и влияние на нее электрического заряда.

Из таблицы 1.2 видно, что сообщение электрического заряда каплям различных топлив снижает температуру их воспламенения, что свидетельствует об интенсификации процесса воспламенения топлив при их электризации. Этот эффект следует отнести на счет интенсификации процесса испарения движущихся заряженных капель топлива, а также иницирующего воздействия ионизированных молекул топлива на кинетику предпламенных реакций.

При этом уменьшается и время задержки воспламенения капли τ_c с увеличением заряда капли топлива (см. таблицу 1.3).

Сообщение электрического заряда каплям различных топлив снижает температуру их воспламенения, что свидетельствует об интенсификации процесса воспламенения топлив при их электризации. Этот эффект следует отнести на счет интенсификации процесса испарения движущихся заряженных капель топлива, а также иницирующего воздействия ионизированных молекул топлива на кинетику предпламенных реакций.

Таблица 1.2 – Влияние электрического заряда капли на температуру воспламенения капель различных углеводородных топлив

Заряд капли q_k , пКл	Температура воспламенения, $t^0_{воспл}$, °С			
	ДЛ	ТС-1	Б-70	А-72
0	932,5	888,8	779,8	800,0
20,7			779,8	
37,8			765,2	
41,4				783,0
43,8		875,0		
51,8				791,4
57,8			763,4	
63,0				782,4
79,7	924,2			
94,1		861,0		
124,0		853,7		
129,2	895,8			
189,2	886,1			

Необходимым условием эксперимента было сохранение постоянным диаметра капель, попадаемых в реакционную трубу для выбранных топлив. Для дизельного топлива ДЛ диаметры капель были равны 3 мм, для бензина А-72 и реактивного топлива ТС-1 – 2,8 мм, а для авиационного бензина Б-70 диаметр капель был равен 2,7 мм.

Электрический заряд капель измерялся индукционным датчиком, сигнал с выхода которого через усилитель подавался на шлейфовый осциллограф, а также поступал на вход электроннолучевого осциллографа.

При этом уменьшается и время задержки воспламенения капли τ_c с увеличением заряда капли топлива (см. и таблица 1.3).

Влияние заряда на время задержки воспламенения свободно падающих капель топлива. Время задержки воспламенения τ_c свободно падающих капель топлива измеряется временем с момента попадания капли топлива в нагретую трубу до появления видимой вспышки. Оно определяется в общем случае тремя факторами: временем нагрева, интенсивностью испарения и временем химической индукции. При этом основную роль играют прогрев и период индукции, как наиболее инерционные.

Примерно одинаковый наклон кривых $t_{воспл}^{\circ} = f(q_k)$ позволяет судить об одинаковом для всех топлив механизме воздействия электрического заряда на процесс воспламенения капель.

Как следует из таблицы 1.3 время задержки воспламенения уменьшается с увеличением электрического заряда капли топлива. Для реактивного топлива ТС-1 оно уменьшилось более чем в 2 раза, с 0,085 с без заряда до 0,036 с при заряде капли 117,2 пКл [75, 92, 99, 25, 26, 87].

Для качественного анализа влияния электрических зарядов и полей на процессы сгорания была поставлена серия экспериментов на открытом турбулентном пламени горелки для наэлектризованных углеводородных топлив.

Влияния электрических зарядов и полей на процессы сгорания топлива. При экспериментах на открытом турбулентном пламени горелки для наэлектризованных углеводородных топлив зарегистрировано [75, 92, 99, 25, 26, 87] уменьшение длины факела пламени на (18÷27)% в зависимости от типа топлива. Было при этом зарегистрировано уменьшение длины факела пламени на (18÷27)% в зависимости от типа топлива

к как уменьшение длины пламени происходило без изменения расхода топлива, то имеет место факт интенсификации горения топлива при его электризации, в результате чего происходит более концентрированное выделение энергии топлива.

Таблица 1.3 – Влияние заряда капель топлива на время задержки воспламенения различных углеводородных топлив

<i>Заряд капли</i>	<i>Время задержки воспламенения, τ_c, с</i>			
	<i>ДЛ</i>	<i>ТС-1</i>	<i>Б-70</i>	<i>А-72</i>
q_k , пКл				
0	0,063	0,085	0,06	0,076
17,4			0,057	
30,5		0,074		
35,2				0,062
42,2			0,05	
58,6	0,055			0,052
65,6		0,057		
100,8		0,031		
117,2		0,036		
158,0	0,03			
181,0	0,037			

Влияние электрического заряда на состав отработавших газов. Топливо из испарителя через регулирующий вентиль поступает в промежуточную камеру, где сообщается ему униполярный заряд. Далее оно поступает через пневматическую форсунку в прямооточную камеру сгорания [75, 92, 99, 25, 26, 87]. Контроль за расходом паров топлива осуществляется с помощью дроссельного расходомера переменного перепада давлений. Из камеры сгорания

продукты сгорания принудительно отсасывались вентилятором. Расход воздуха, а, следовательно, и избыток воздуха в камере сгорания, поддерживались постоянными.

Для каждого топлива опытным путем подбирался устойчивый факел и все эксперименты для заряженного и незаряженного топлива проводились при неизменных расходах топлива и воздуха.

Для измерения температуры продуктов сгорания в камере сгорания (в ее выходной сопловой части) устанавливалась хромель-алюминиевая термопара, которая подключалась к автоматическому потенциометру.

Исследовалось количество окиси углерода CO в продуктах сгорания, для чего из выхлопного трубопровода бралась проба газа на химический анализ.

В промежуточной камере для сообщения заряда парам топлива в течение определенного времени сообщался униполярный электрический заряд подачей соответствующей длительности напряжения при постоянной для всех экспериментов его величине.

Количество твердых частиц в продуктах сгорания измерялось с помощью специальных фильтров, через которые в течение строго определенного для всех опытов времени пропускались продукты сгорания или отводились мимо них с помощью двух переключающих заслонок. Данные фильтры устанавливались на выходе выхлопного трубопровода.

При сжигании определенного количества топлива (во всех экспериментах выбиралось 50 грамм топлива) выделившиеся в результате сгорания твердые частицы (нагарообразования) отлагались на фильтрах, которые затем взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,1 мг, а количество образующегося нагара относилось к одному грамму сгоревшего топлива.

Эксперименты показали, что величина нагарообразования для различных топлив с сообщением им электрического заряда и без него различна и зависит от способности топлива приобретать электрический заряд (диэлектрической проницаемости и электропроводности), но уменьшалась для всех исследуемых топлив.

Особенно сильное снижение нагарообразования наблюдалось для дизельного топлива ДЛ и реактивного топлива ТС-1.

Принимая нагарообразование бензола за единицу, относительное нагарообразование для дизельного топлива ДЛ без заряда топлива составило 1,1, а при сообщении ему электрического заряда – 0,47, т.е. уменьшилось в 2,34 раза. Для реактивного топлива ТС-1, соответственно, при отсутствии электрического заряда относительная величина нагарообразования была 0,53, а при его наличии составила 0,38, т.е. нагарообразование уменьшилось в 1,5 раза.

Уменьшение нагарообразования (снижение количества твердых частиц в продуктах сгорания) при сообщении униполярного заряда топливу является прежде всего качественным результатом улучшения протекания процессов сгорания и повышения полноты сгорания.

Увеличение концентрации ионов в пламени при сгорании заряженных топливовоздушных смесей интенсифицирует окислительные процессы и приводит к большей полноте сгорания углеводородных топлив. При этом в отработавших газах было обнаружено значительное уменьшение окиси углерода, дыма и твердых продуктов сгорания.

Влияние электрического заряда топливных смесей на кинетику процесса горения. Экспериментальная установка представляет собой металлическую трубу с внутренним диаметром 58 мм и длиной 2000 мм. [75, 92,-95, 99] Вокруг трубы установлен подогреватель для регулирования и поддержания температуры. В проведенных опытах температура поддерживалась в пределах 50 °С. Готовая топливовоздушная смесь подавалась в трубу и выдерживалась в течение времени, необходимого для выравнивания концентрации смеси по всей трубе.

Источником зажигания смеси являлся искровой разрядник.

Для сообщения униполярного электрического заряда находящейся в трубе гомогенной топливной смеси использовались электроды типа игла-плоскость, один из которых находился на оси трубы. Во всех экспериментах время

сообщения смеси униполярного заряда поддерживалось строго постоянным, причем перед подачей искры зажигания заряд топливной смеси прекращался.

Скорость распространения фронта пламени измерялась с помощью трех фотоэлектронных умножителей, расположенных в начале, середине и конце трубы, сигналы с выходов которых записывались шлейфовым осциллографом.

В результате установлено, что скорость перемещения фронта пламени для таким образом заряженной гомогенной смеси бензина А-95 (по сравнению с незаряженной смесью) увеличилась с 16,9 м/с до 18,4 м/с.

С уменьшением октанового числа марки бензина увеличение скорости распространения фронта пламени (при наличии электрического заряда топлива) резко возрастает. Так, для бензина А-72 скорость распространения фронта пламени при сгорании топлива увеличилась с 8,7 м/с (без заряда) до 20 м/с при наличии электрического заряда, т.е. возросла в 2,3 раза. Следовательно, при сообщении электрического заряда топливной смеси низкооктанового бензина А-72 при ее сгорании скорость распространения фронта пламени стала больше, чем аналогичная скорость сгораемой смеси незаряженного высокооктанового бензина А-95.

Результаты экспериментов показывают, что интенсификация процесса горения, выраженная в увеличении скорости распространения пламени, полностью соответствует степени электризуемости сжигаемых топлив, т.е. бензин А-95 и А-72 дают изменения в скорости распространения пламени соответственно их способности приобретать электрический заряд [75, 92, 99, 25, 26, 87].

1.3 Конструктивное исполнение топливных форсунок авиационных двигателей

В настоящее время к авиационным двигателям предъявляются высокие требования по их экологическим характеристикам (эмиссия вредных веществ и уровень шума) [43 - 47] . Эти требования (международные нормы ИКАО) постоянно ужесточаются, что приводит к необходимости в разработке новых

технических решений для существующих узлов двигателя. Применительно к эмиссии вредных веществ, все ведущие двигателестроительные компании вкладывают значительные научные и финансовые ресурсы в совершенствование камер сгорания. При этом качество распыла – один из наиболее значимых факторов, позволяющий обеспечить снижение эмиссии вредных веществ. Важным фактором является также величина перепада давления на форсунке, при которой обеспечивается требуемое качество распыла.

В этом плане на сегодняшний день применительно к газотурбинным авиадвигателям оптимальной конструкцией считается пневматическая форсунка [47], различные схемы которой представлены на рисунке 1.5.

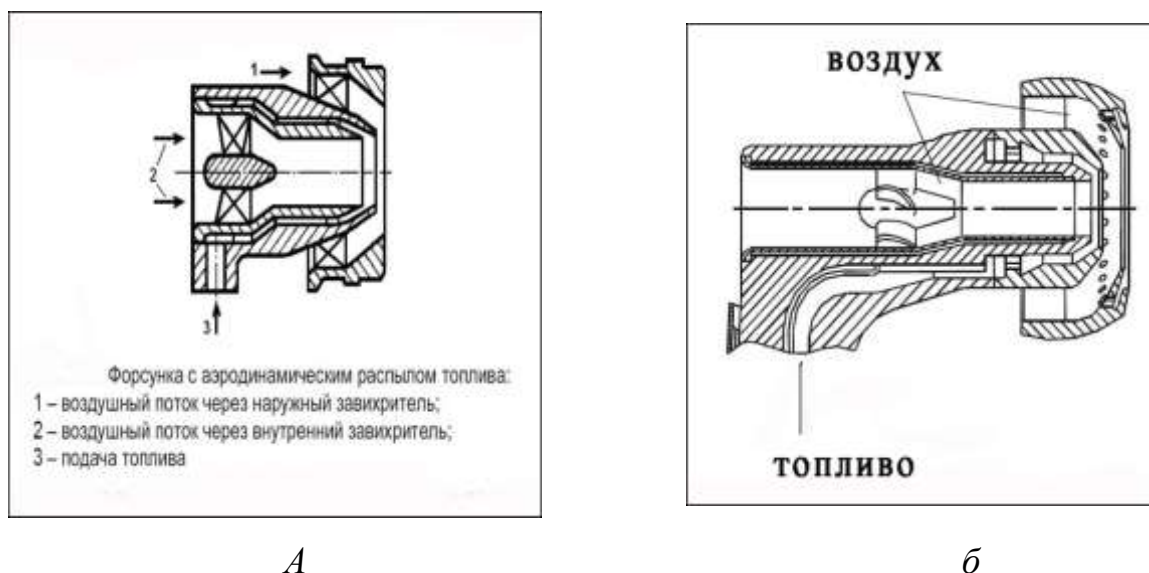


Рисунок 1.5 – Общие схемы пневматической форсунки газотурбинных авиационных двигателей

Схема форсунки, представленная на рисунке 1.5, является типичной для камер сгорания богато-бедного типа [47, 168 – 177], широко применяемых в газотурбинных авиационных двигателях. Если сравнить внутренний и наружный воздушные каналы, то можно увидеть, что через фронтное устройство камеры сгорания подается относительно небольшое количество воздуха. Для камер сгорания бедного типа пневматические форсунки имеют, как правило, значительно более сложную конструкцию.

Суть распыла топлива пневматической форсункой заключается в обдуве топливной пленки воздухом с её внутренней и внешней стороны [47, 168, 172]. В этом случае турбулентные пульсации активно участвуют в процессе распада пленки. Для вовлечения сил инерции в процесс дробления капель, топливо и воздух предварительно закручивают. Противоположная закрутка воздуха, проходящего через внутренний и наружный завихрители, позволяет максимально интенсифицировать процесс распада пленки и дальнейшее дробление капель. Вместе с тем, противоположная крутка, как правило, приводит к более значительным нестационарным эффектам. Это может негативно сказаться на устойчивости процесса горения на некоторых режимах работы камеры сгорания.

Высокое качество распыла топлива пневматической форсункой на различных режимах работы авиационного двигателя позволяет значительно снизить процесс сажеобразования. Это приводит к снижению теплового излучения и, соответственно, снижает лучистый тепловой поток, негативно воздействующий на стенки жаровой трубы.

В ряде случаев наружный завихритель выполняют двойным [177, 170 - 176]. В этом случае получается двухстадийная система распыла топлива, что позволяет обеспечить ещё лучшее качество распыла. Однако в этом случае, требуется, чтобы достаточно большое количество воздуха проходило через наружный завихритель. В противном случае малые высоты каналов будут отрицательно сказываться на качестве распыла.

Кроме пневматических форсунок можно также отметить ударно-пневматические форсунки [172]. В этом случае в распаде топливной пленки принимает участие не только воздух, идущий по тракту двигателя, но и воздух от внешнего источника с существенно большим давлением.

Возможен также распыл, когда топливо подается под большим давлением в относительно медленно движущийся спутный поток воздуха. Форсунки такого типа называются механическими [172]. Наиболее ярким представителем механических форсунок являются широко распространенные центробежные форсунки (рисунки 1.6 - 1.9). В таких форсунках топливо подается под большим

давлением. Закручиваясь в тангенциальных пазах форсунки, топливо выходит наружу в виде конусообразной топливной пленки. Распад топливной пленки происходит под действием центробежных сил и турбулентных пульсаций. Толщина пленки, форма конуса, и, как результат, качество распыла в такой форсунке сильно зависит от перепада давления топлива на форсунке. Это основной недостаток центробежных форсунок.

В камере подогрева стартер воздушно газовый (КП СТВГ) турбореактивного двигателя используется одноконтурная центробежная форсунка [38] (рисунки 1.6, 1.7).

На рисунке 1.6 и рисунке.1.7, *а,б* приведены принципиальные схемы системы распыления топлива и камеры сгорания КП СТВГ.

На рисунке 1.7,*а,б* приняты следующие обозначения: 1 – корпус; 2 – жаровая труба; 3 – форсунка топливная; 4 – свеча зажигания; 5 – вход камеры сгорания, на который подаётся воздух от компрессора; 6 – кольцевой канал для прохода потока воздуха (II); 7 – штуцер подвода топлива; 8 – трубка подвода топлива; 9 – корпус форсунки; 10 – смесительная втулка; 11 – зона горения жаровой трубы; 12 – два ряда основных отверстий для дополнительной подачи воздуха и для сжатия им (воздухом) обратных потоков; 13 – сопловые аппараты турбины; 14 – распылённый конус факела капель керосина (закрученный); 15 – закрученные потоки воздуха, поступающие в смесительную втулку.

Камера сгорания КП СТВГ (рисунке 1.7,*а,б*) включает в себя корпус 1, жаровую трубу 2, топливную форсунку 3, свечу зажигания 4.

Воздух от компрессора подаётся на вход 5 камеры сгорания. Этот воздух разделяется на два потока I и II. Поток I подаётся в фронтное устройство камеры сгорания, а поток II подаётся в кольцевой канал 6, образованный корпусом 1 и жаровой трубой 2.

Топливо подаётся к штуцеру 7, и через трубку 8 подводится к корпусу форсунки 9. Далее топливо, пройдя через втулку 4 (рисунок 1.6) попадает в полость 6 (рисунок 1.6), из которой подаётся к винтовым пазам топливного шнекового завихрителя 5. С использованием винтовых пазов 5 топливо

закручивается и далее из сопла 8 (рисунок 1.6) выходит в виде закрученного топливного конуса с углом раскрытия 80-120 градусов.

Топливный конус представляет собой вначале сплошной участок при малых давлениях, а потом закрученная струя разбивается на мелкие полидисперсные капли, диаметр которых составляет приблизительно 40-50 мкм.

Топливо подаётся под давлением около 10 атм. При этом массовый расход топлива составляет около 40 кг/час.

На выходе форсунки образуется сплошной туман из мелких полидисперсных капель топлива.

Воздух, подходящий к фронтальному устройству, закручивается воздушным завихрителем 2 (рисунок 1.6). Закрученный поток воздуха взаимодействует с капельным факелом топлива, подаваемого через форсунку 3, и далее смешивается в смесительной втулке 10 (рисунок 1.7).

В смесительной втулке необходимо стремиться получить гомогенную смесь. В настоящее время это не вполне обеспечивается. Поэтому один из путей получения гомогенной топливной смеси является использования воздействий электрических полей на процессы распыления топлива.

Закрутка топлива и воздуха осуществляется по часовой стрелке, если смотреть со стороны входа в камеру сгорания.

Проведенные эксперименты показали, что противофазная закрутка воздуха и топлива одни параметры горения могут улучшить (например, полноту сгорания, устойчивость сгорания), но ухудшают другие показатели (надёжность запуска). Поэтому принята схема синхронной закрутки воздуха и топлива по часовой стрелке. Далее закрученная таким образом смесь попадает в зону горения 11 (рисунок 1.7) жаровой трубы.

Для обеспечения эффективности горения воздух из кольцевого канала II подаётся через два ряда основных отверстий 12 (рисунок 1.7).

Продукты сгорания попадают на сопловые аппараты 13 турбины СТВГ.

Для запуска камеры подогрева используется свеча непосредственного прожига. Для поджига топливно-воздушной смеси на свечу подается напряжение 27 В, при этом имеет место ток 2 – 3 А.

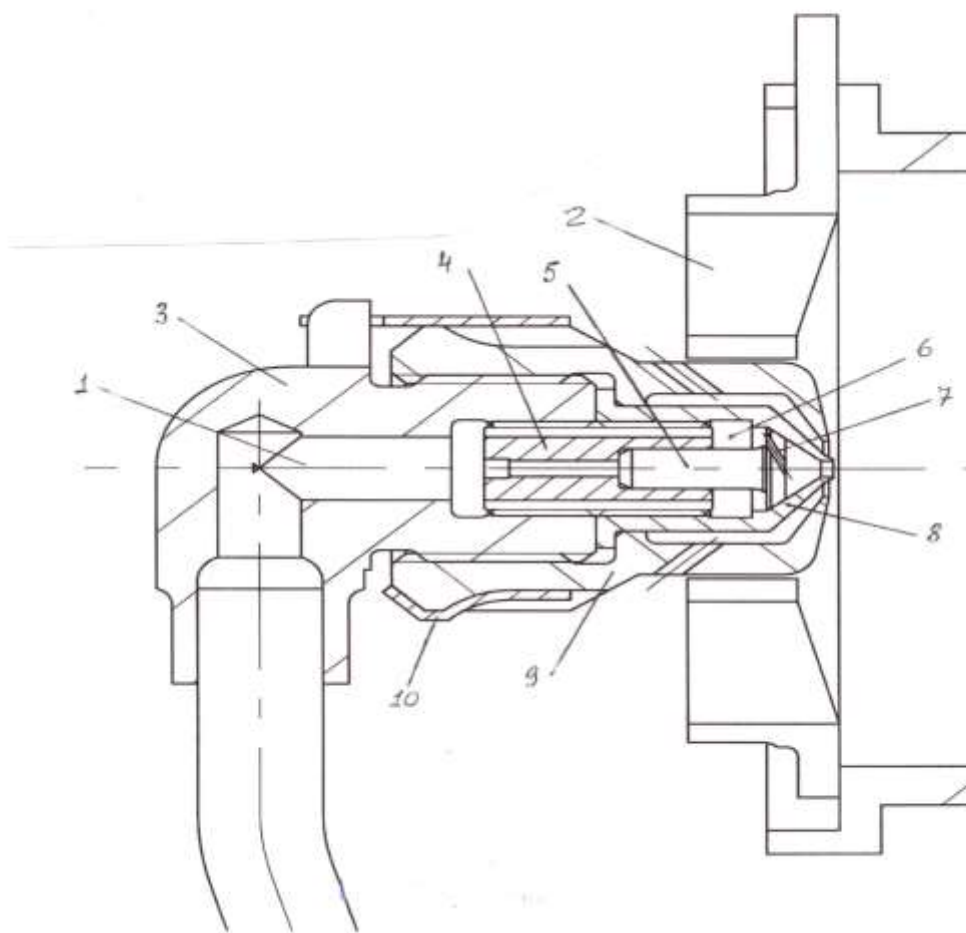


Рисунок 1.6 – Система распыления топлива камеры сгорания КП СТВГ

турбореактивного авиационного двигателя :

- 1- форсунка; 2 - воздушный завихритель; 3 - корпус форсунки; 4- втулка; 5 - топливный шнековый завихритель; 6 - полость, в которую попадает топливо после втулки 4; 7 - паз для закрутки керосина; 8 - сопло; 9 - колпачок; 10 - кольцо контрольное

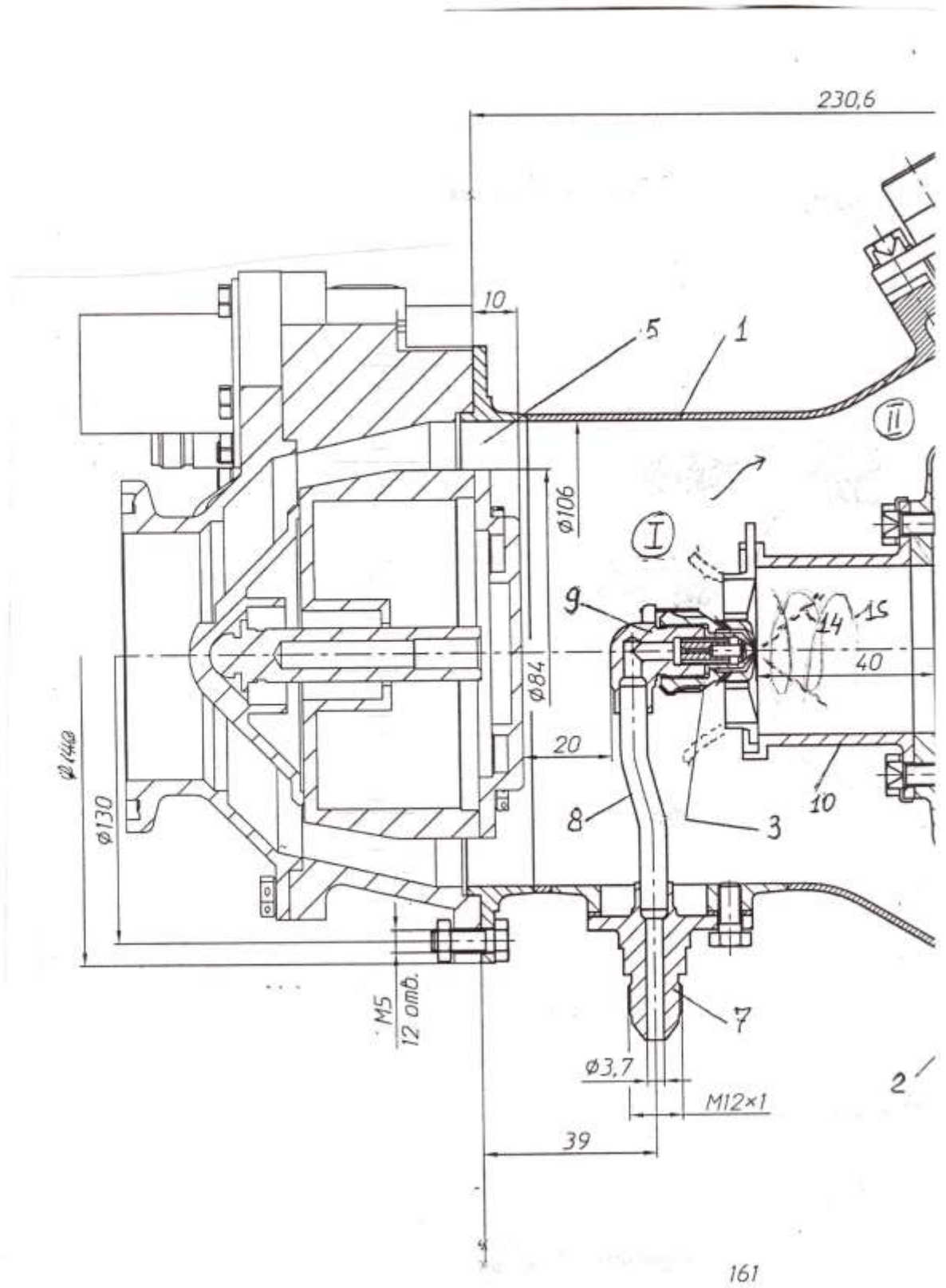


Рисунок 1.7,а – Принципиальная схема КП СТВГ турбореактивного авиационного двигателя

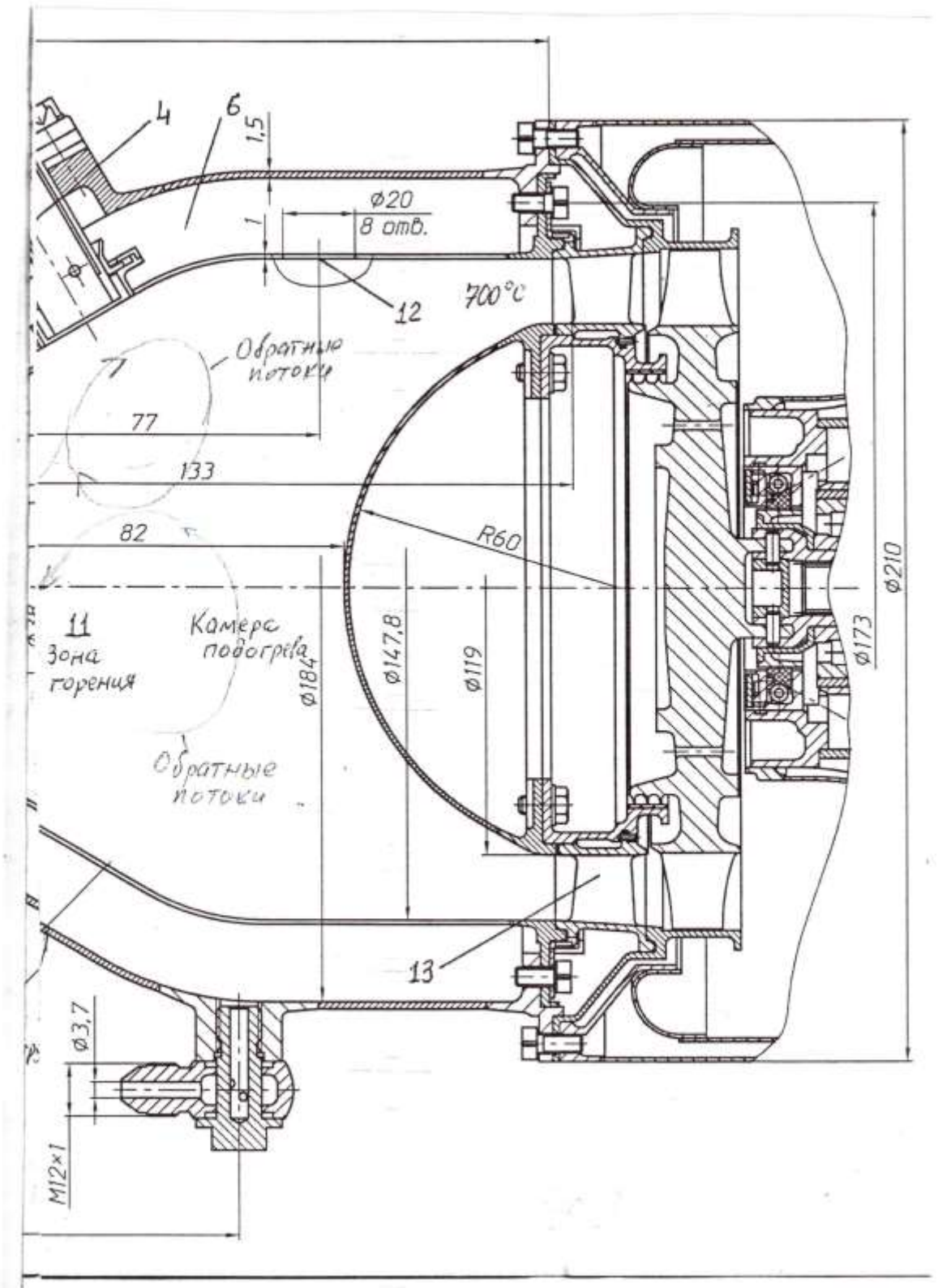


Рисунок 1.7,б – Принципиальная схема КП СТВГ турбореактивного авиационного двигателя

Известна также топливная центробежная двухконтурная форсунка газотурбинной установки (ГТУ) разработки ФГУП «ММПШ «Салют» (г. Москва) [41].

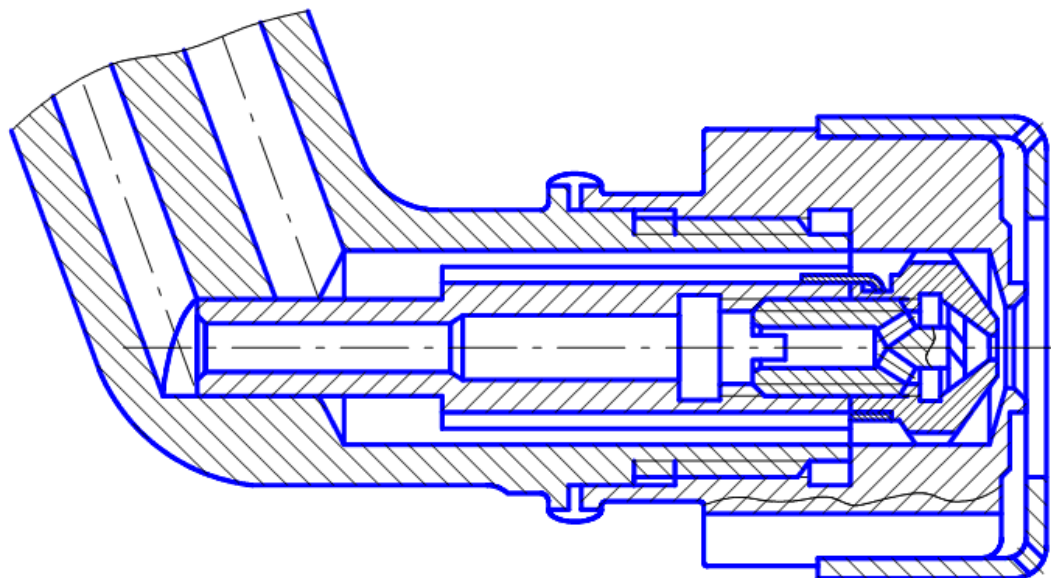


Рисунок 1.8 – Двухконтурная центробежная форсунка газотурбинной установки

На штатном изделии ФГУП «ММПШ «Салют» на режимах пониженной мощности топливо подаётся по первому контуру (каналу), на режимах повышенной и максимальной мощности топливо подаётся одновременно по двум контурам (каналам). Данная форсунка имеет воздушный завихритель. Оба топливных контура форсунки заканчиваются центробежными распылителями, в которые топливо поступает по нескольким внутренним каналам в соответствующие камеры закручивания и покидает их, приобретая интенсивное вращательное и поступательное движение. Распылители заканчиваются суживающимися соплами. При истечении из сопла закрученная топливная струя разворачивается в полый тонкостенный конус, который затем разрушается на капли.

Как правило, приемлемое качество распыла можно получить при перепаде давления топлива на форсунке 0.15-0.2МПа. Вместе с тем, как правило, на низких режимах работы авиационного двигателя, такой перепад обеспечить не удастся, в связи с очень широким диапазоном по расходу топлива, который должна

обеспечивать топливная форсунка. Для решения этой задачи применяются так называемые двухступенчатые (или двухканальные) форсунки (рисунок 1.9). У таких форсунок имеется два топливных канала и два сопла. На режимах ниже малого газа топливо подается только по центральному каналу и проходит через центральное сопло. Таким образом, на этих режимах обеспечивается требуемый перепад топлива на форсунке. На более высоких режимах, топливо начинает поступать и через наружный канал. Это позволяет обеспечить работу форсунки и на максимальных режимах работы авиационного двигателя.

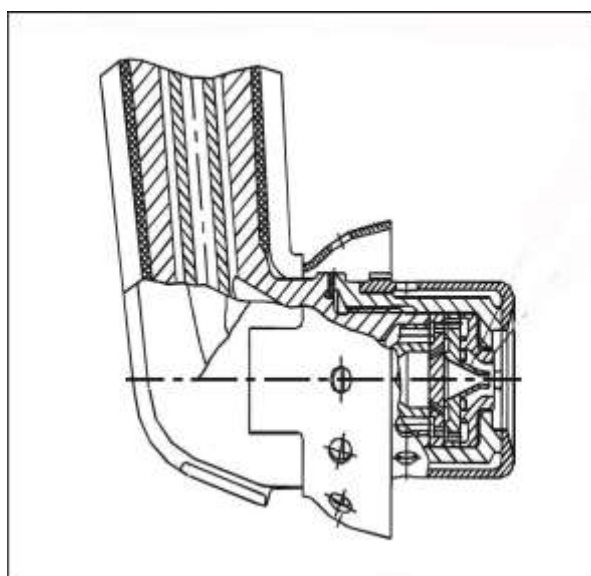


Рисунок 1.9 - Двухканальная центробежная форсунка

1.4 Аналитический обзор современной научно-технической литературы по численному моделированию процессов распыла и горения топлива

Распыление топливной смеси через пневматическую или центробежную форсунки является очень сложным физическим процессом с точки зрения гидроаэродинамики. Основной особенностью является совместное постоянное взаимодействие двух фаз: воздуха и жидкости. Действительно, процесс распыления жидкости связан с явлением гидродинамической неустойчивостью движущегося относительно газа объема жидкости, имеющего свободную поверхность, на которой действует поверхностное натяжение.

В пневматических форсунках топливо выбрасывается в виде тонкой закрученной пленки в воздушную закрученную струю. Поверхностное натяжение стремится сжать свободную поверхность топлива, что, в свою очередь, приводит в конечном итоге при взаимодействии с воздушным потоком к разрушению единой поверхности жидкой пленки и образованию отдельных капель. На процесс каплеобразования при этом существенно влияет характер обтекания топлива воздухом.

Для корректного описания процесса взаимодействия двух фаз, в результате которого происходит дробление жидкой фазы, необходимо с достаточной точностью уметь описывать динамическое поведение как газообразной фазы, так и жидкой фазы по отдельности с их межфазным взаимодействием. Ключевые роли здесь играют массоперенос, турбулентность, поверхностное натяжение, физико-молекулярные свойства и др.

Для решения задачи о распылении жидкой фазы в форсунках и струйных аппаратах в настоящее время широко применяются численные методы, основанные на интегрировании нестационарных дифференциальных уравнений вязкой жидкости Навье-Стокса [178]. В частности данные подходы используются и при расчетах распыления топлива как в пневматических, так и в центробежных форсунках [47, 170 - 176, 179].

Стоит отметить, что успех в получении корректного и точного гидродинамического поведения многофазного течения закладывается еще на этапе выбора расчетной и математической модели и методов и численного решения уравнений. Так, численная модель должна учитывать как конструктивные особенности расчетной области так характер течения жидкости и газа, а численная схема интегрирования быть устойчивой, робастной и рациональной с точки зрения времени счета.

1.4.1 Численные модели и подходы применительно к решению задачи о распылении топлива в газовой среде

Математические модели. Наиболее целесообразным методом моделирования течения в форсунке для проведения многопараметрических исследований является численный метод решения уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости [31]. Течение в форсунке является существенно турбулентным, для его описания в настоящее время имеется несколько различных подходов.

Наиболее точным с физической точки зрения является метод прямого численного моделирования (DNS — Direct Numerical Simulation), в котором для описания турбулентного потока используются решение нестационарных уравнений Навье-Стокса на очень мелкой расчетной сетке [32]. Однако, в настоящее время этот подход мало применим в реальных практических задачах, поскольку требует несоизмеримого с практически задачами времени расчета и вычислительных ресурсов.

Следующим по точности моделирования является метод крупных вихрей (LES — Large Eddy Simulation), который так же оперирует с нестационарными уравнениями, однако, предполагает, что турбулентные структуры, возникающие в потоке и имеющие характерные масштабы менее размера ячейки расчетной сетки, могут быть промоделированы с помощью так называемой подсеточной моделью турбулентности [33, 34, 35]. Однако, одним из недостатком метода LES можно считать необходимость иметь очень подробную сетку вблизи стенок (что связано с особенностями турбулентности вблизи стенки), что в рассматриваемом случае течения в форсунке практически сводит на нет его преимущества по сравнению с DNS.

Одним из наиболее быстрых методов моделирования турбулентных потоков является RANS-подход (Reynolds Averaged Navier-Stokes), при котором уравнения Навье-Стокса осредняются по времени, и появляющиеся из-за присущей этим уравнениям нелинейности члены моделируются при помощи некоторой полуэмпирической модели турбулентности [180, 181]. Данный подход развивается уже в течение последних нескольких десятков лет и обеспечивает приемлемую точность для большинства инженерных задач, при этом основной

задачей при выборе этого метода для моделирования является определение наиболее адекватной модели турбулентности, которых в настоящее время имеется более десятка.

Установлено [182], что при численном решении задач турбулентного течения жидкости в каналах наилучшее согласие с экспериментом дают модели турбулентности семейства $k-\omega$. В этих моделях в дополнение к осредненным по времени (или, другими словами, по Рейнольдсу) уравнениям Навье-Стокса добавляются два уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации ω . Среди семейства этих моделей наиболее универсальной можно считать SST-модель, предложенную F.Menter в 1993 году (последняя версия опубликована в 2003 году) [184, 185], которая вполне приемлемо описывает не только течение, но и тепловые характеристики в газовых турбинах [186]. Поскольку течение в форсунке является существенно закрученным, для адекватного моделирования необходимо вводить поправку на кривизну линий тока Спаларта-Шура [177, 187].

Помимо перечисленных подходов к моделированию турбулентных течения также существуют гибридные методы, сочетающие LES-модели и RANS-модели (например, DES — Detached Eddy Simulation — метод отсоединенных вихрей), которые с одной стороны более затратны по ресурсам чем RANS-подход, но позволяющие более детально и точно описывать турбулентное течение [188].

В качестве основополагающих уравнений для моделирования течения жидких и газообразных сред выступает система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, объединяющая в себя законы сохранения импульса и массы [44].

Решение полной системы уравнений течения жидкости и газа Навье-Стокса аналитическими подходами не представляется возможным в силу их сложности. В современной практике широкое применение находят подходы на основе численного интегрирования системы уравнений. В качестве численных схем, используются методы конечных разностей [189], конечных элементов [190] или контрольных объемов [191], реализуемые на основе дискретизации исследуемого пространства. Идея всех трех методов основывается на разбиении пространства

на конечное число простых подобластей в виде треугольников и четырехугольников в плоской постановке и тетраэдров, гексаэдров, призм и пирамид для пространственной постановки. Далее, используя ту или иную разностную схему или специально выбранную аппроксимирующую функцию, система дифференциальных уравнений преобразуется в конечную систему алгебраических уравнений.

Применительно к практическим задачам метод конечных разностей является малоэффективным, так как требует построения правильной разностной схемы, что возможно только на очень простых формах исследуемого пространства.

Метод конечных элементов и метод контрольных объемов являются существенно более устойчивыми к выбору форм дискретизации исследуемого пространства и широко используются при решении практических задач. Основной отличительной особенностью является применение данных методов к формулировке дифференциальных уравнений. Так, метод конечных элементов преимущественно применяется для Лагранжева описания сплошной среды применительно к задачам механики деформированного твердого тела, однако может быть применен и для задач гидродинамики. Метод контрольных объемов используется для при Эйлера описания сплошной среды применительно к задачам гидродинамики. Применение Эйлера описания для расчета струйного течения можно найти в большом количестве работ [192-196].

Например, среднемедианный контрольный объем V_i , связанный с узлом $i = 1, \dots, N$ гибридной сетки, где N — число узлов, строится таким образом, что геометрические центры ячеек сетки с вершиной в узле i соединяются друг с другом через середины разделяющих их граней [191]. Пример контрольного объема показан на рисунке 1.10. Несмотря на то, что такой выбор контрольного объема требует примерно в шесть раз большего объема памяти по сравнению со случаем, когда контрольный объем совпадает с ячейкой расчетной сетки, он позволяет получить более точные результаты.

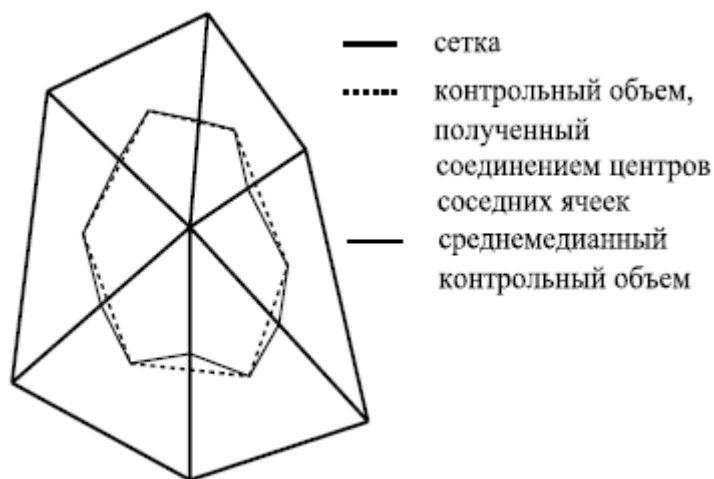


Рисунок 1.10 - Контрольный объём

Таким образом, для численного решения задачи гидродинамики наиболее эффективным подходом представляется применение алгоритмов на основе метода контрольных объемов. Именно данный метод используется в таких современных численных пакетах численного решения задач гидродинамики как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CCM, Flow Vision, Flow3D, Open Foam и др.

Анализ методов дискретизации расчетной области. При использовании выше обозначенных численных методов на основе дискретизации расчетной области необходимо уделить отдельное внимание способам построения расчетных сеток.

Традиционно при решении задач газовой динамики применяются регулярные сетки (структурированные сетки с четырехугольными ячейками на поверхности и шестигранными в пространстве). Регулярность заключается в том, что сетка представляет собой упорядоченную по определенным правилам структуру данных с выраженными сеточными направлениями (в общем случае имеется криволинейная система координат). В преобразованном (вычислительном) пространстве ячейки сетки являются топологическими прямоугольниками (двумерные задачи) или параллелепипедами (трехмерные задачи).

Для структурированных сеток сравнительно легко реализуются вычислительные алгоритмы на основе современных монотонных методов высокого порядка точности. Однако диапазон геометрических объектов,

описываемых структурированными сетками, ограничен. Как правило, невозможно построить единую сетку для всей расчетной области, в связи с чем, производится разделение поля течения на подобласти, в каждой из которых генерируется своя сетка регулярной структуры. Блочный подход предоставляет широкие возможности для использования эффективных численных методов внутри отдельных блоков. Основным недостатком блочного подхода состоит в достаточно сложной процедуре сшивки решений, полученных в различных подобластях.

Характерной особенностью неструктурированных сеток [197] является произвольное расположение узлов сетки в физической области. Произвольность расположения узлов понимается в том смысле, что отсутствуют выраженные сеточные направления и нет структуры сетки, подобной регулярным сеткам. Число ячеек, содержащих каждый конкретный узел, может изменяться от узла к узлу. Узлы сетки объединяются в многоугольники (двумерный случай) или в многогранники (трехмерный случай). Как правило, на плоскости используются треугольные и четырехугольные ячейки, а в пространстве — тетраэдры и призмы.

Основное преимущество неструктурированных сеток перед регулярными состоит в большей гибкости при дискретизации физической области сложной формы, а также в возможности полной автоматизации их построения. Для неструктурированных сеток легче реализуются локальные сгущения и адаптация сетки в зависимости от поведения решения.

Современные программы генерации сеток позволяют за приемлемое время строить сетки для сколь угодно сложных геометрических объектов. Для дискретизации уравнений Навье-Стокса применяются метод конечных элементов и метод конечного (контрольного) объема. Метод конечных разностей на таких сетках неприменим.

Неструктурированные сетки широко используются при расчете внутренних течений жидкости и газа [198,199]. Однако, в отличие от хорошо разработанных технологий метода конечных элементов, конечно-объемные технологии на неструктурированных сетках характеризуются отсутствием единых принципов, позволяющих провести дискретизацию конвективных и диффузионных потоков,

источниковых членов, а также учет граничных условий. Достаточно часто способы дискретизации, имеющие различные характеристики, объединяются.

Гибридные сетки предполагают комбинирование регулярных и неструктурированных областей, позволяя сочетать достоинства и снизить влияние недостатков, присущих каждому типу сеток [197].

Во многих случаях, использование простой структурированной или неструктурированной сеток является недостаточным, особенно, это проявляется в зонах, где ожидаются значительные градиенты в расчетных переменных. В случае моделирования многофазного течения такой переменной служит фаза среды. Так, для качественно хорошего моделирования границы раздела фаз требуется дополнительно обеспечить сгущение в области раздела границы жидкости и газа. В гидроаэродинамике также существует естественный градиент скорости вблизи твердых стенок, так называемый пограничный слой, где в очень тонком слое скорость резко падает от конечного значения до нуля.

Для моделирования таких особенных зон, как правило, используется дополнительное сгущение сеток или адаптация, которая может быть динамической или статической.

Динамическая адаптация требует использование специальных сеточных алгоритмов, позволяющих проводить адаптацию (перестроение) сетки в процессе расчета в зависимости от заданного критерия и характера развития течения. Моделирование многофазного течения с учетом адаптации нашло отражение в работах [200,201].

Численные схемы интегрирования по времени. При решении задачи о распылении жидкой фазы в потоке воздуха принципиально рассматривать задачу в нестационарной постановке, т.е. когда все гидродинамические параметры изменяются не только по пространству, но и во времени.

Существует два основных метода решения нестационарных задач. Метод, в котором неизвестные величины на текущем временном шаге выражаются через величины предыдущего временного шага, которые уже известны, называется *явным*. В *неявном* же методе величины на текущем временном шаге выражаются

друг через друга. Явный метод более прост, однако на него накладываются дополнительные ограничения по временному шагу, в то время как никаких ограничений (кроме физических) на временной шаг в неявном методе не накладываются. Наиболее распространенными методами интегрирования являются явный и неявный методы Эйлера и их модификации [196].

Явный метод Эйлера. Название метода отражает тот факт, что при его использовании получаются явные зависимости искомой величины от величин уже известных. То есть, нам не требуется производить никаких дополнительных действий для получения решения.

Неявный метод Эйлера (*Euler implicit method*). В неявной схеме искомая величина выражается через другие величины на том же временном шаге (можно использовать линейную интерполяцию).

Данный метод не налагает ограничений на временной шаг (ограничения на временной шаг налагаются чисто физические – если временной шаг будет больше характерного времени протекания какого-либо процесса, то мы его просто «пропустим»). Однако он требует больших вычислительных затрат. Эти затраты особенно ощутимы в задачах с большим количеством ячеек в сетках. К примеру, стандартные задачи на внешнее обтекание могут потребовать расчётных сеток с несколькими миллионами ячеек. Это означает, что при использовании неявного метода потребуется решить систему из нескольких миллионов уравнений. Даже при нынешнем уровне развития вычислительной техники это потребует значительного времени.

Модели турбулентности. Следующим фактором при численном моделировании, на который необходимо обратить внимание, является выбор подхода к моделированию турбулентных потоков и вихрей, их характеризующих и имеющих место в топливных форсунках. По своей сути турбулентное течение является самопроизвольно образующимся хаотически изменяющимся неустойчивым, носящим случайный характер движением элементарных частиц среды (топлива, воздуха).

Структура турбулентного течения представляет собой совокупность вихрей малой и большой размерности, распространяющихся по потоку и существенно влияющего на характер общего течения среды. Описание турбулентного течения является в общем случае практически численно неразрешимой задачей, так как для описания всех масштабов вихрей потребовались бы дискретизация расчетной области на очень большое количество очень маленьких подобластей – элементов или ячеек. Это, в свою очередь, потребовало бы чрезвычайно огромных вычислительных ресурсов и большого времени счета. Такое моделирование носит название прямого численного моделирования DNS (Direct numerical simulation) и используется, например, в работе [202-204].

В качестве альтернативных подходов рассматриваются методы, основанные на упрощении моделирования турбулентности путем введения определенных предположений, осреднений и добавления в систему уравнений Навье-Стокса дополнительных алгебраических и дифференциальных уравнений. Используемое осреднение позволяет исключить локальные мелкомасштабные пульсации и получить видоизмененные уравнения более приемлемые для практических расчетов.

Нестационарное решение точных уравнений Навье-Стокса для сложных потоков с большим числом Рейнольдса на данный момент является невозможным. Существует два альтернативных способа представления уравнений Навье-Стокса в которых не учитываются мелкомасштабные турбулентные пульсации: метод осреднения по правилам Рейнольдса и метод фильтрации. Обе методики требуют дополнительных уравнений для замыкания всей системы.

Метод осреднения уравнений Навье-Стокса имеет английскую аббревиатуру "RANS" (Reynolds-averaged Navier-Stokes) и предполагает запись уравнений переноса осредненного по времени потока, со всеми предполагаемыми масштабами турбулентности. Такой подход значительно уменьшает вычислительные ресурсы, необходимые для решения численной задачи. В том случае, если осредненный поток является стационарным, то основные уравнения не содержат производных по времени и установившееся решение получается

более экономичным. Вычислительное преимущество наблюдается даже для случая переходных режимов, т.к. шаг по времени определяется глобальной неустойчивостью осредненного потока, а не турбулентностью. Метод осреднения уравнений Навье-Стокса в основном применяется в промышленности для решения инженерных задач, и используется в таких моделях турбулентности, как: "Spalart-Allmaras" [205], k - ε и ее разновидностях [206], k - ω и ее разновидностях [207], комбинированной модели сдвиговых напряжений SST [208] и модели Рейнольдсовых напряжений "RSM". В задачах о моделировании распада струй и распыла из форсунок такие модели применяются в работах [168, 179, 198, 209]. Опишем наиболее распространенные модели.

Стандартная « k - ε » модель турбулентности. В RANS моделях турбулентное движение производится путем введения в расчетную систему дополнительной вязкости (турбулентной вязкости). Определение этой вязкости является одной из основных задач при учете турбулентных движений. Для определения этой вязкости разработаны несколько моделей турбулентного движения. В частности, одной из таких моделей турбулентности является дифференциальная модель второго порядка, основанная на совместном решении уравнений переноса импульса, кинетической энергии и скорости диссипации – так называемый метод « k - ε ».

Модель турбулентности « k - ω ». Модель турбулентности « k - ω » основана на совместном решении уравнений переноса импульса, турбулентной кинетической энергии и удельной скорости диссипации..

SST (Shear Stress Transport) модель. Среди работ, внесших существенный вклад в развитие полуэмпирических моделей турбулентности, следует особо отметить работу Ментера (1993). Основываясь на том, что модели турбулентности типа « k - ε » лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений, а модели типа « k - ω » имеют преимущество при моделировании пристеночных течений, Ментер предложил модель, сочетающую в себе указанные сильные стороны « k - ε » и « k - ω »- моделей. Для этого « k - ε » - модель переформулировалась в терминах k и ω , а затем в полученные в результате модельные уравнения введена эмпирическая

функция F_l , обеспечивающая плавный переход от « $k-\omega$ » - модели в пристеночной области к « $k-\varepsilon$ »- модели вдали от твердых стенок. Функция F_l конструируется таким образом, чтобы быть равной единице на верхней границе пограничного слоя и стремиться к нулю при приближении к стенке. Сшивка предполагается в области следа пограничного слоя.

Нестационарная модель LES. Модель больших вихревых структур имеет английскую аббревиатуру "LES" (Large Eddy Simulations) [210] и использует альтернативный подход, в котором большие вихри решены в нестационарной постановке с использованием системы, так называемых, «фильтрующих» уравнений. Набор «фильтрующих» уравнений по существу служит для исключения из расчета подсеточных вихрей, т.е. вихрей, размер которых меньше ячеек расчетной сетки.

Как и в случае осреднения по Рейнольдсу, процесс фильтрации требует добавления специальных уравнений для замыкания всей системы. Статистические величины осредненного потока, которые в основном и имеют практический интерес, представляются в зависимости от времени. Привлекательность LES модели заключается в том, что она рассчитывает потери, вызванные самим режимом турбулентного течения, в отличие от моделей турбулентности, относящихся к классу RANS. Возможно это качество делает ее универсальной для расчета турбулентных течений с тенденцией мелкомасштабных вихрей, что имеет место в ярко выраженных изотропных потоках, т.е. когда макроскопические особенности потока преобладают над крупномасштабными вихрями.

Стоит подчеркнуть, что применение LES модели в промышленных задачах крайне ограничено. LES модель использует пространственную дискретизацию высокого порядка, что позволяет разрешить большой диапазон масштабов турбулентности. Но имеет место, ухудшенная точность решения осредненных параметров потока в LES модели, что не всегда документируется. В добавление, стоит отметить, что использование пристеночных функций с LES моделью требует дальнейшей ратификации.

Тем не менее, при современном уровне компьютерных мощностей модель LES довольно широко используется, том числе при расчетах многофазных течений применительно к распаду струй и распылу жидких пленок. Результаты таких работ приведены в [202, 204, 209, 211, 212].

Более приемлемыми с точки зрения точности, имеют гибридные модели, объединяющие в себе совокупность LES и RANS моделей. Такими моделями являются модель отсоединенных вихрей DES (Detached Eddy Simulation) [213] и модель адаптивного масштаба SAS (Scale-Adaptive Simulation) [214]. В отличие от LES модели моделирование пристеночных областей осуществляется путем использования RANS моделей турбулентности. А в области, достаточно удаленной от стенок, применяется нестационарная LES модель. Для связи двух моделей используется специальная функция на основе масштаба вихрей и размера расчетных ячеек. В зависимости от соотношения линейных масштабов RANS и LES модель DES функционирует либо как базовая RANS модель, либо как ее подсеточная версия. В результате в областях потока, в которых используемая сетка является слишком грубой и непригодна для численного разрешения турбулентных структур, DES функционирует как RANS, а в областях с достаточно мелкой сеткой – как подсеточная модель LES [212]. Сравнение подходов LES и DES моделей турбулентности к расчету завихренных течений приведено в [215].

Существенным недостатком DES модели может являться большая зависимость от сеточного разбиения, так как переходная граница между областями с RANS и LES моделированием неоднозначна. Более точной в этом смысле моделью является модель SAS, по своей сути основанная на модели Менгера SST с введением дополнительного источника в уравнение для частоты. Данный источник активируется в том случае, когда в потоке реализуются разрешенные пульсации. Т.е. при относительно грубой сетке, например, вблизи стенки модель работает как стандартная SST модель, а в областях с достаточной разрешимостью вихри моделируются подобно LES модели. И хотя широкого

применения данный метод пока не нашел некоторые примеры его применения отражены в работах [216, 217].

Моделирование межфазного взаимодействия жидкость - газ. При моделировании двухфазного взаимодействия одной из задач является корректное определение границ раздела фаз (свободной поверхности), учет межфазных сил и массопереноса. Для моделирования раздела фаз существует несколько методов: метод объема жидкости VOF (Volume of fluid method) [218], метод набора уровня Level Set Method (LSM) [219,220] , метод движения границы раздела (Front Tracking) [221].

Метод переноса объемной доли жидкости VOF основан на предположении существования четкой границы раздела фаз. В таком случае объемная доля, например, топлива r_w в различных точках пространства – величина дискретная: 0 – в воздухе, 1 – в топливе и определяется через вводимую скалярную функцию $F(t, x)$ имеющую в данном случае смысл объемной концентрации жидкости.

$$F(t, x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega_1, \\ 0, & x \in \Omega_2 \cup \Gamma. \end{cases}$$

Здесь Ω_1 – область нахождения более плотной среды (жидкость), а Ω_2 – область, занимаемая менее плотной средой (газ), Γ является границей раздела фаз.

Система уравнений динамики сплошной среды дополняется уравнением переноса

$$\frac{\partial F}{\partial t} = V \cdot \nabla F,$$

где V — вектор скорости движения среды.

В ячейке объем жидкости определяется как $V_w = r_w V$, где V – объем ячейки. В этом случае плотность смеси вычисляется через плотность воздуха (ρ_a) и жидкости (ρ_w) как $\rho = \rho_w r_w + \rho_a (1 - r_w)$. При численном моделировании такого течения используется двойной набор основных уравнений – уравнения движения и энергии для жидкости и воздуха, а межфазовый перенос находится исходя из площади поверхности контакта в ячейке $A = \nabla r_w$.

Для удовлетворения условиям равновесия система уравнений дополняется граничными условиями на границе раздела фаз

$$(\tau_1 - \tau_2)\mathbf{n} = (p_1 - p_2 + \sigma K)\mathbf{n}.$$

$$V_1 = V_2,$$

Здесь индексы 1 и 2 отвечают номеру среды (жидкость - газ), $\tau_i = \mu_i(\nabla V_i + \nabla V_i^T)$ — тензор вязких напряжений, p_i — давления на границе со стороны двух фаз, \mathbf{n} — единичный нормальный вектор, внешний по отношению к Ω_1 , K — кривизна поверхности Γ , σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Преимуществом данного метода является сохранение объемного содержания компонент, недостатком служит сложность в расчете пространственных градиентов, поскольку функция VOF не является непрерывной. Данный метод является самым распространённым и реализован во всех современных пакетах численного моделирования гидродинамических процессов. Применение данного метода нашло отражения в следующих работах [65, 81, 85, 86, 87, 88, 89]

Метод набора уровня LSM является схожим с методом VOF. В данной модели поверхность раздела фаз фиксируется и движется посредством функции уровня $\phi(t, x)$, $|\phi| \leq 1$, вид которой может быть в известном смысле произвольным, а сечение $\phi(t, x) = 0$ совпадает с границей раздела фаз, зависящей от расстояния от границы. Функция уровня является гладкой и непрерывной, и ее пространственный градиент может быть вычислен точно. В свою очередь, используя его можно аккуратно оценить кривизну границы и поверхностное натяжение вызванное кривизной. Однако недостатком данного метода является не сохранность объемного содержания фазовых компонент. Данный метод использован в работах [90, 91].

Для избегания сложностей в методах VOF и LSM, целесообразно их использование совместно. Такая связанная модель реализована, например, в пакете ANSYS Fluent.

1.4.2 Численное моделирование процессов горения

Основной функцией форсунки является образование облака топливной смеси, состоящей из взвеси капель в воздухе и подача ее в камеру сгорания, где в процессе горения происходит большой объем выделения тепловой энергии.

Процесс моделирования горения является не менее сложным этапом, чем моделирование распыла топлива под воздействием сложного турбулентного течения. В области численного моделирования процесс горения учитывается путем введения в расчет дополнительных уравнений и законов в виде соответствующих моделей горения.

Как известно, горение — сложный физико-химический процесс превращения исходных веществ в продукты сгорания в ходе экзотермических реакций, сопровождающийся интенсивным выделением тепла. [91] Химическая энергия, запасённая в компонентах исходной смеси, может выделяться также в виде теплового излучения и света. Светящаяся зона называется фронтом пламени или просто пламенем.

В рамках численного моделирования процесс горения принято разделять на две основные зоны:

- Зона пламеобразования - это тонкая область, в которой протекают наиболее интенсивные химические реакции, результатом которых является образование «видимого» пламени;

- Зона без пламяобразования – область, в которой происходит объемное горение вещества. Такой вид горения возможен в заранее перемешанной смеси горючего и окислителя, тогда реакция горения может происходить во всём объёме, занятом горючей смесью.

Для описания подобных процессов вводится понятие стехиометрической поверхности. Стехиометрическая поверхность представляет собой плоскость, отделяющую область горения, где состав смеси, такой, что окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления горючего.

В общем случае горение можно разделить на три вида: горение несмешанного топлива, горение частично заранее смешанного топлива с воздухом, горение заранее смешанного топлива с воздухом.

Процесс горения напрямую зависит от скорости смешивания и скорости протекания химической реакции. Относительная скорость химической реакции имеет решающее значение.

Для описания скорости протекания химической реакции вводится такое понятие как число Дамкёлера (Da) — критерий подобия, определяющий отношение скорости течения химической реакции к скорости других процессов, происходящих в системе. В общем случае его можно выразить как отношение характерного времени физического процесса к характерному времени химической реакции. Применительно к нашему случаю, число Дамкёлера является отношением времени смешивания топлива с окислителем t_{mix} к времени протекания химической реакции t_{chem} .

$$Da = \frac{t_{mix}}{t_{chem}}$$

Если $Da \gg 1$, то реакция считается быстрой и её скорость ограничена лишь скоростью смешивания компонентов. Если $Da \ll 1$, то реакция считается медленной и её скорость ограничена временем протекания химической реакции.

При реализации процесса горения топливо, окислитель и продукты процесса горения рассматриваются как массовые доли многокомпонентной жидкости. Каждая массовая доля вычисляется из общего уравнения переноса.

Наиболее популярными являются три модели протекания процессов горения:

- Eddy Dissipation Model (EDM)
- Finite Rate Chemistry Combustion Model (FRC)
- PDF Flamelet model

Eddy Dissipation Model (EDM)

Данная модель применяется только в моделях с турбулентными течениями, в которых топливо заранее смешано с окислителем. При расчете предполагается,

что химическая реакция имеет высокую скорость, относительно скорости процессов переноса ($Da \gg 1$). Скорость реакции пропорционально времени турбулентного смешивания, зависящего от кинетической энергии и скорости её диссипации.

Скорость протекания реакции зависит от составляющей R_f , которая в EDM модели определяется минимумом концентрации компонент и скоростью турбулентного [97].

EDM - модель предполагает полное сгорание топлива. При этом максимальная температура горения располагается в зоне стехиометрического горения или на границе с зоной перенасыщенной топливом. Минимальная скорость протекания реакции устанавливается там, где находится максимум температур, данная точка оказывается местом полного сгорания топлива. Максимальная температура при протекании реакции задается пользователем [98].

Finite Rate Chemistry Combustion Model (FRC). Данная модель используется в том случае, если скорость протекания химической реакции медленная ($Da \ll 1$), при этом скорость больше не зависит от скорости смешивания компонентов. Также применяется для моделей, в которых топливо заранее смешивают с окислителем. Скорость реакции определяется напрямую из химического взаимодействия с помощью средних значений массовых долей и температуры. Используются средние значения скорости, поскольку скорость протекания химической реакции мала, по сравнению со скоростью относительно быстрых турбулентных флуктуаций. Для описания химической реакции используется классическое уравнение Аррениуса, которое устанавливает зависимость константы скорости химической реакции от температуры [97].

В реальных расчетах применяется комбинированная схема, объединяющая в себе преимущества EDM и FRC модели [99, 100]. При таком подходе возможно решение достаточно сложных задач, включающих в себя несколько источников подачи топлива и сложные формы турбулентного течения. При расчете таких задач, для описания турбулентных потоков применяется LES модель турбулентности.

PDF Flamelet model. Данная модель используется для моделирования быстрых химических реакций ($Da \gg 1$), в которых топливо заранее не смешивается с окислителем. Предполагается, что само горение происходит на границе раздела фаз, в тонких слоях, называемых очагами диффузионного горения. Турбулентная природа горения рассматривается как совокупность таких ламинарных, по своей структуре, очагов. Отдельные уравнения движения при этом не решаются, берутся средние значения. Стоит отметить, эта модель подходит только для реакций, в которых участвует только один вид топлива и один вид окислителя. [97].

Сами реакции горения рассчитываются по уравнениям, заложенным в программный пакет. Скорости химических реакций при этом высчитываются по уравнениям Аррениуса.

При анализе различных источников становится очевидно, что подобная схема решения достаточно хорошо коррелирует с аналитическими расчетами и экспериментальными данными при расчете достаточно простых, геометрически несложных моделей с одним источником подачи топлива [74]. При расчете турбулентных течений в этом случае использовалась LES-модель турбулентности.

Анализ пакетов и использованных в них методов численного моделирования применительно к задачам распыла жидкости.

В современной практике для выполнения численных расчетов в области гидроаэродинамики широко применяются специализированные пакеты мирового уровня такие как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CCM, FlowVision, Flow3D, OpenFoam и др. Все они имеют определенные преимущества и недостатки, однако базируются на одних и тех же принципах. Преимущества и недостатки отражаются в наборе определенных инструментов, моделей и схем интегрирования. Однако, для моделирования многофазных течений струй и распыла следует выделить прежде всего такие пакеты как ANSYS CFX, ANSYS Fluent. С помощью данных пакетов выполнены такие современные работы как [168, 47, 179, 222, 223]. Несомненное преимущество ANSYS Fluent является наличие большого количества инструментов и методов для моделирования

многофазного течения и разрешения межфазной границы в процессе движения жидкости. Так с помощью ANSYS Fluent существует возможность моделирования многофазного течения с динамически адаптирующейся в процессе расчета сеткой в области раздела фаз. Данный подход позволяет с достаточной точностью моделировать достаточно мелкие капли при ограниченном количестве расчетных ячеек. В тоже время численная схема интегрирования не обладает достаточной робастностью, что чаще всего приводит к проблемам со сходимостью, настройка которой может представлять дополнительную сложность. В тоже время ANSYS CFX, имеет существенно более устойчивый решатель. Более того ANSYS CFX обладает встроенным модулем решения электромагнитных уравнений Максвелла, что необходимо для выполнения расчетов в рамках предполагаемых исследований и модернизации форсуночных модулей.

Приведем некоторые характерные примеры используемых пакетов численного моделирования и используемых в них численных методов в известных публикациях последних лет.

В [168] объектом исследования является форсунка пневматического типа в сборе с внешним воздушным завихрителем. Используется программное обеспечение: Ansys CFX 14.5, Ansys ICEM CFD 14.5. Для определения характеристик процессов газовой динамики использовалось решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса методом контрольных объемов. Применялась неявная схема со вторым порядком аппроксимации по пространству (схема high resolution) и первым порядком по времени. Система уравнений Рейнольдса замыкалась с помощью SST (Shear Stress Transport) модели Ментера. Для описания течения жидкости выбрана VOF (Volume of Fluid) модель. Метод переноса объемной доли жидкости основан на предположении существования четкой границы раздела фаз. Проведено трехмерное моделирование воздушного и воздушно-капельного потоков в пневматической форсунке. Показано хорошее качественное совпадение между результатами численного моделирования и экспериментальными измерениями. Надо отметить, что из-за неструктурированной тетраэдрической сетки большой размерности

общее время расчета одной модели в среднем составило 27 дней, из чего можно сделать вывод, что, несмотря на достаточную точность решения, данный метод является очень ресурсозатратным.

В [179] объектом исследования является двухсопловая центробежная форсунка. С помощью конечно-элементной модели прогнозируется угол конуса распыла топлива. Используемое программное обеспечение: Ansys Fluent 11. Решение основывается на стандартных уравнениях Навье-Стокса и $k-\omega$ модели турбулентности. Используемая для анализа VOF-модель базируется на следующих допущениях: компоненты жидкости несжимаемы, между ними нет теплообмена, компоненты не перемешиваются и химически не реагируют. Свойства (такие как давление и скорость), вычисляемые уравнениями переноса, определяются наличием различных долей компонентов в каждом контрольном объеме. Применена тетраэдрическая расчетная сетка, размером 1,2 миллиона элементов, однако отсутствует детальная проработка пограничного слоя. Трехмерные моделирования достаточно точно коррелируют с экспериментальными данными, однако есть отличия от эксперимента, связанные с достаточно грубой расчетной сеткой.

Следует заметить, что большое количество статей и публикаций посвящены изучению подобным моделям прямоструйного течения, среди них такие работы как [222 - 224]. В этих работах используются различные программные обеспечения, такие как Ansys Fluent, Ansys CFX, FreeFOAM и др. Для решения задачи везде используются классические уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды, VOF-метод для аппроксимации свободной поверхности и LES-модель для описания турбулентного движения жидкости.

В [203] объектом исследования является пневматическая форсунка с закручивающимся воздушным потоком. Используемое программное обеспечение: собственный программный комплекс Red Mesa с большими вычислительными мощностями. Используются уравнения Навье-Стокса для двухфазной жидкости, VOF-метод для описания межфазного взаимодействия, LES-модель, как наиболее точная. Расчетная сетка содержит 402 миллиона

элементов с реализацией сгущения сетки вблизи мест соединения каналов течения. Посчитанные модельные задачи имели очень хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Полученные результаты легли в разработку реальной топливной форсунки.

В [225] рассматривается модельная задача распыления капли. Объектом исследования является расплавленная капля меди, находящаяся в цилиндрическом канале. Воздушный поток в канале распыляет каплю на отдельные фракции. Первоначальный размер капли 1 мм. Скорость воздушного потока достаточно велика и равна 400 м/с или 230 м/с в зависимости от модели, температура набегающего потока 2000 К. Используемое программное обеспечение: OpenFOAM. Используются уравнения Навье-Стокса для двухфазной жидкости, VOF-метод для описания межфазного взаимодействия, LES-модель турбулентности. Применена гексаэдральная расчетная сетка – 9 миллионов элементов со сгущением вокруг капли. Данная модель достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Этого удалось достичь благодаря достаточно мелкой расчетной сетке. Авторы не приводят точное значение времени расчета всей модели, однако отмечают, что было затрачено существенное количество расчетных ресурсов.

1.5 Пути повышения эффективности процессов распыла, горения авиационного топлива авиационных двигателей. Постановка задачи исследования

При формулировке показателей и критериев эффективности возможных направлений исследований исходим из того, что объектом исследований и разработок в данной диссертации являются электрокаплеструйные форсуночные модули, включающие в себя как электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ), так и собственно форсунку.

Критерием эффективности функционирования электрокаплеструйных форсуночных модулей является улучшение качества распыла топлива, которое оценивается, в частности, по следующим показателям: получение минимального

диаметра капель распыливаемого топлива на выходе форсунки, однородностью распределения топлива в топливно-воздушной смеси и интегральными показателями улучшения процессов горения топливно-воздушной смеси в камере сгорания авиационного двигателя.

Поэтому достижение этих критериев и показателей целесообразно осуществлять как совершенствованием конструкции собственно топливной форсунки (как элемента форсуночного модуля), так и совершенствованием способов воздействия электрическими полями на топливо авиационных двигателей. При выполнении работы предполагается осуществлять эти два пути в тесном взаимодействии друг с другом. С учетом указанных выше тенденций широкого использования численных методов при разработке инновационных конструкций необходимо предусмотреть возможность верификации экспериментом результатов численного анализа.

Применительно к газотурбинным двигателям в качестве базовой топливной форсунки выбрана пневматическая форсунка для камер сгорания богато-бедного типа авиационных двигателей (типа ПД-14) с максимально возможным достижением сформулированных выше показателей распыла топлива и горения топливно-воздушных смесей.

Применительно к турбореактивным авиационным двигателям ориентируемся на форсунки центробежного типа, поскольку они широко используются в турбореактивных двигателях, газотурбинных установках, а также в современных лазерно – оптических экспериментальных установках. Последнее позволит в дальнейшем корректно провести верификацию экспериментом результатов численных расчетов.

Сложность решения поставленной задачи улучшение распыла и горения с использованием электрических полей заключается в том, что применительно к штатному топливу авиационных двигателей – керосину и к самим авиационным двигателям эта задача решается впервые. Последнее подтвердили проведенные выше результаты патентных и библиографических исследований.

С применением соответствующим образом организованных электрических

полей (с ЭУВТ) при исследованиях и разработке электрокаплеструйных форсуночных модулей предполагается показать пути дальнейшего улучшения показателей распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси на базе топливных форсунок указанных выше типов.

В свою очередь, анализ влияния электрических полей на процессы распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси требует использование уравнений электрогидродинамики, то есть кроме уравнений гидродинамики используются уравнения электродинамики, а в уравнении Навье-Стокса учитываются дополнительные объемные силы воздействия электрического поля на заряженный объем топлива. Таким образом задача анализа влияния электрических полей на процессы распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси существенно еще более усложняется по сравнению со случаем без электрического поля.

Постановка задачи исследования: разработка и исследование эффективных электрокаплеструйных методов создания (без применения инерционных и ненадежных подвижных механических и электромеханических элементов) узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей) авиационных двигателей. Это достигается (на базе разработанных численных моделей исследуемых процессов) выбором их рациональных электрогидродинамических, гидродинамических, электрических, конструктивных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей. При этом форсуночные модули должны обладать повышенными качественными показателями распыла топлива по сравнению с существующими конструкциями и обеспечить улучшение процессов каплеобразования топлива, смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси;

Стратегия исследований электрокаплеструйных форсуночных модулей с электрическими устройствами воздействия на топливо (ЭУВТ), основана на разработанной технологии Динамического конструирования. Данная технология предусматривает использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций форсуночных модулей на современном

лазерно-оптическом и другом оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау» за счет оптимального выбора взаимосвязанных электрогидродинамических, гидродинамических, конструктивных и электрических параметров.

Основным инструментом для оценки образования и распространения струй и капель является пакеты численного моделирования, основанные на численном решении уравнений электрогидродинамики и уравнений вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса в нестационарной постановке.

При численном трехмерном моделировании рассматриваются нестационарные процессы, характерные для авиационных двигателей. Решаются задачи *повышения точности и достоверности численных моделей* с целью получения наибольшего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными. Для этого используются:

- соответствующе геометрии неравномерных расчетных сеток при существенном увеличении числа элементов расчетной сетки (средний размер расчетной сетки составил порядка 30 миллионов объемных элементов);

- новые подходы к численному моделированию на основе математической модели QMOM;

- трехмерные геометрические модели реальных конструкций (гексагональное разбиение расчетной области с дополнительным сгущением в области распыла, в качестве формы элемента используются правильные параллелепипеды и тетраэдры, дающие большую точность в численных расчетах);

- адаптивные схемы иерархического последовательного усложнения модели;

- рациональные вихререзающие подходы для моделирования турбулентности:

- метод крупных вихрей LES, когда крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются с использованием большого числа объемных элементов расчетной сетки;

-метод отсоединенных вихрей DES, удачно сочетающий сильные стороны модели SST (RANS), а именно надежность расчета безотрывных течений, с возможностью расчета течений с обширными зонами отрыва, обеспечиваемой моделью LES);

- современные вычислительные среды. (ANSYS Fluent, ANSYS ICEM CFD, ANSYS CFX, OpenFOAM), приспособленные автором к решению таких сложных процессов, как рассматриваемые электрогидродинамические процессы.

В качестве метода численного моделирования межфазного взаимодействия используется метод объема жидкости VOF, реализованный во всех широко распространенных пакетах численного моделирования.

1.6 Основные выводы по разделу

1. В настоящее время для повышения эффективности процессов горения углеводородных топлив наиболее широко используются следующие способы воздействия на топливо: сильным магнитным полем; комбинированное воздействие магнитными и электрическими полями; сильными однородным постоянным или переменным электрическим полем; сильным резко неоднородным постоянным или переменным электрическим полем; относительно слабым переменным электрическим полем. Данные способы, как правило, рассматриваются применительно к двигателям внутреннего сгорания и различного рода горелкам.

2. Применительно к авиационным двигателям использование электрических полей для повышения эффективности распыла и сгорания керосина рассматривается в данной диссертации впервые.

3. Физика процесса воздействия сильных магнитных и электрических полей на топливо, его структуру и его свойства, на горение углеводородных топлив пока до конца не ясна.

4. Исследования показали, что сообщение электрического заряда каплям топлива улучшает показатели воспламенения и горения топлив и топливно-

воздушных смесей, а также диспергирования топлив. Однако эти исследования проведены при атмосферном давлении и малых перепадах давлений, когда скорости капель очень малы, что существенно отличается от условий работы авиационных двигателей.

5. Наиболее целесообразно сообщать униполярный электрический заряд потоку топлива и/или каплям топлива в резко неоднородном электрическом поле между электродами типа «игла – плоскость». При этом ориентироваться в дальнейшем на комбинированное воздействие резко неоднородных и однородных постоянных и переменных электрических полей как в цепях подачи топлива в форсунку, так и в самой форсунке.

6. С целью увеличения объемной плотности электрического заряда, заряжающие электроды типа «игла – сопло» размещаются непосредственно в потоке углеводородного топлива. В одномерном приближении получено формула для распределения плотности объемного электрического заряда по длине струи углеводородного топлива, связывающая электрофизические и гидродинамические параметры струи. Оценено влияние электрической проводимости топлива и подвижности ионов на распределение объемной плотности электрического заряда и даны рекомендации повышения объемной плотности электрического заряда конструктивным исполнением электродов. Показано, что можно получить объемную плотность электрического заряда на срезе сопла до $10^{-1} \hat{E} \epsilon / \dot{v}^3$.

7. Сформулированы показатели и критерии эффективности возможных направлений исследований с учетом того, что объектом исследований и разработок в данной диссертации являются форсуночные модули, включающие в себя как электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ), так и собственно форсунку. При этом ориентируемся на широко используемые в авиационных двигателях топливные форсунки: пневматическими форсунками – для газотурбинных двигателей и центробежными форсунками – для турбореактивных двигателей.

8. Критерием эффективности функционирования форсуночных модулей является улучшение качества распыла топлива, которое оценивается, в частности,

по следующим показателям: получение минимального диаметра капель распыливаемого топлива на выходе форсунки, однородностью распределения топлива в топливно-воздушной смеси и интегральными показателями улучшения процессов горения топливно-воздушной смеси в камере сгорания авиационного двигателя.

9. Достижение этих критериев и показателей целесообразно осуществлять как совершенствованием конструкции собственно топливной форсунки (как элемента форсуночного модуля), так и совершенствованием способов воздействия электрическими полями на топливо авиационных двигателей в тесной взаимосвязи друг с другом.

10. Форсуночные модули должны обладать повышенными качественными показателями распыла топлива по сравнению с существующими конструкциями и обеспечить улучшение процессов каплеобразования топлива, смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси.

11. С учетом указанных выше тенденций широкого использования численных методов с существенным увеличением числа расчетных элементов при разработке инновационных конструкций необходимо предусмотреть возможность верификации экспериментом результатов численного анализа.

12. Для дальнейших исследований выбраны широко применяемые в авиадвигателях базовые топливные форсунки (как элементы форсуночных модулей): применительно к газотурбинным двигателям - пневматические форсунки для камер сгорания богато-бедного типа авиационных двигателей (типа ПД-14); применительно к турбореактивным авиационным двигателям - форсунки центробежного типа. С применением соответствующим образом организованных электрических полей (с ЭУВТ) при исследованиях и разработке форсуночных модулей предполагается показать пути дальнейшего улучшения показателей распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси на базе топливных форсунок указанных выше типов. Последнее имеет самостоятельное значение.

13. При численном моделировании процессов распыла топлива и топливно-воздушной смеси в математических моделях необходимо применять систему

уравнений электрогидродинамики, то есть кроме уравнений гидродинамики используются уравнения электродинамики, а в уравнении Навье-Стокса учитываются дополнительные объемные силы воздействия электрического поля на заряженный объем топлива. При этом задачи численного анализа существенно усложняются по сравнению со случаем без электрического поля, тем более (как показали проведенные библиографические исследования) применительно к форсуночным модулям эта задача решается впервые.

14. Сформулирована **задачи исследования:** разработка и исследование эффективных электрокаплеструйных методов создания (без применения инерционных и ненадежных подвижных механических и электромеханических элементов) узлов распыла топлива (форсуночных модулей) авиационных двигателей выбором (на базе разработанных численных моделей исследуемых процессов) их рациональных электрогидродинамических, гидродинамических, электрических, конструктивных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей.

15. **Стратегия исследований** форсуночных модулей основана на разработанной технологии Динамического конструирования. Данная технология предусматривает использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций форсуночных модулей на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау» за счет оптимального выбора взаимосвязанных электрогидродинамических, гидродинамических, конструктивных и электрических параметров.

16. Основным **инструментом** для оценки образования и распространения струй и капель является пакеты численного моделирования, основанные на численном решении уравнений электрогидродинамики и уравнений вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса в нестационарной постановке.

17. При численном трехмерном моделировании рассматриваются нестационарные процессы, характерные для авиационных двигателей. Решаются задачи **повышения точности и достоверности численных моделей** с целью

получения наибольшего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными. Для этого используются: соответствующе геометрии неравномерных расчетных сеток при существенном увеличении числа элементов расчетной сетки (средний размер расчетной сетки составил порядка 30-50 миллионов объемных элементов); новые подходы к численному моделированию на основе математической модели QMOM; трехмерные геометрические модели реальных конструкций (гексагональное разбиение расчетной области с дополнительным сгущением в области распыла, в качестве формы элемента используются правильные параллелепипеды и тетраэдры, дающие большую точность в численных расчетах); адаптивные схемы иерархического последовательного усложнения модели; рациональные вихреразрешающие подходы для моделирования турбулентности (метод крупных вихрей LES, метод отсоединенных вихрей DES); современные вычислительные среды (ANSYS Fluent, ANSYS ICEM CFD, ANSYS CFX, OpenFOAM).

18. В качестве метода численного моделирования межфазного взаимодействия используется метод объема жидкости VOF, реализованный во всех широко распространенных пакетах численного моделирования.

19. С позиций точности расчетов процессов горения проанализированы различные модели горения (EDM, FRC, комбинированная).

2 ОСНОВЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ТОПЛИВО, СООБЩЕНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ПОТОКАМ И КАПЛЯМ ТОПЛИВА

В электрических устройствах воздействия на топливо при разработке форсуночных модулей могут использоваться как однородные, так и резко неоднородные постоянные и переменные электрические поля. Поэтому необходимо учитывать все многообразие физических и электрогидродинамических явлений, происходящих в диэлектрических жидкостях вообще и в топливе в частности при приложении электрического поля того или другого вида [76, 79, 87 – 91, 226 - 231].

2.1 Влияние электрического поля на вязкость топлива

При приложении к потоку топлива поперечного постоянного однородного электрического поля можно ожидать изменение вязкости рабочей жидкости в первом приближении под влиянием двух составляющих, связанных с микропроцессами, происходящими в топливе под действием поля [12, 91].

Следовательно, для потерь напора по длине в результате изменения сопротивления движущегося топлива (ΔH) можно записать

$$\Delta H = \Delta H_{11} + \Delta H_{12}, \quad (2.1)$$

где ΔH_{11} - потери напора за счет увеличения коэффициента вязкости жидкости вследствие ориентирующего действия поля на дипольные молекулы рабочей жидкости (углеводородные топлива являются слабодипольными жидкостями);

ΔH_{12} - потери напора за счет гидродинамического воздействия на поток жидкости вследствие взаимодействия дипольных моментов и электрического поля в жидкости. Считаем, что до приложения электрического поля поток жидкости в исследуемом канале является ламинарным.

Оценим влияние каждой из составляющих на изменение начального гидравлического сопротивления:

Для ламинарного потока потеря напора по длине выражается формулой Пуазейля

$$H_f = 32\mu l v (gd^2), \quad (2.2)$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости; l - длина канала; v - скорость жидкости; g - ускорение свободного падения; d - диаметр канала.

Из выражения (2.2) видно, что потери напора по длине прямо пропорциональны кинематическому коэффициенту вязкости ν и при его изменении также будут меняться. В свою очередь, $\nu = \mu / \rho$, здесь ρ - плотность жидкости, а динамический коэффициент вязкости $\mu = \tau (dv_x / dy)$, где τ - касательное напряжение на элементарной площадке, лежащей на поверхности соприкасающихся слоев движущейся жидкости; dv_x / dy - градиент скорости движения слоев в направлении y , перпендикулярном к рассматриваемым слоям жидкости.

Отсутствие общей теории жидкого состояния привело к тому, что до настоящего времени пока не удалось разработать точные, теоретически обоснованные методы расчета коэффициентов вязкости. В многочисленных работах показано, что коэффициент вязкости жидкостей связан с потенциалом межмолекулярных сил. По Грину [232], величина динамического коэффициента вязкости μ пропорциональна $\exp[-W_r / (kT)]$, где W_r - энергия взаимодействия двух молекул, находящихся на расстоянии r ; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура.

В силу того, что авиационные топлива являются слабополярными жидкостями, для вычисления величины W_r можно воспользоваться формулой Леннарда-Джонса

$$W_r = 4a[(c/r)^{12} - (c/r)^6],$$

где a и c - постоянные сил, зависящие от взаимодействия молекул (рисунок 2.1). Обычно величины a и c определяются экспериментально. Поэтому практическое

применение известных формул для расчета вязкости встречает серьезные затруднения.

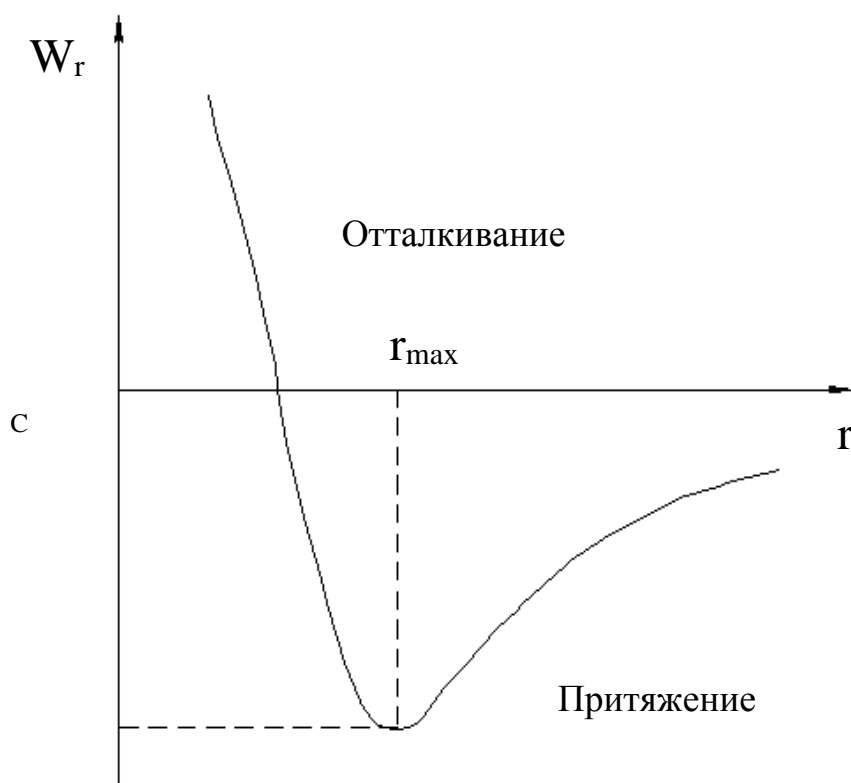


Рисунок 2.1 – Зависимость энергии взаимодействия двух слабополярных молекул от расстояния r между ними

Увеличение коэффициента вязкости жидкости под действием электрического поля оценим по методике Панченкова [80], в которой предполагается, что вязкость обусловлена переносом количества движения за счет временного объединения близлежащих молекул. Для образования таких объединений необходимо не только чтобы кинетическая энергия молекул была меньше энергии связи, но и чтобы молекулы были определенным образом ориентированы относительно друг друга для возникновения силы притяжения между ними.

Для динамического коэффициента вязкости μ имеем

$$\mu = c_1 \{1 - \exp[-W_0 / (RT)]\};$$

где c_1 - коэффициент.

Вероятность образования связи (вероятность объединения молекул)

$$\delta_1 = N_1 / N = 1 - \exp[-W_0 / (RT)];$$

N_1 - число молекул, энергия которых меньше энергии связи,

$$N_1 = N \{1 - \exp[-W_0 / (RT)]\},$$

N - общее число молекул; W - энергия связи; R - универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

При помещении жидкости в электрическое поле вследствие ориентирующего действия поля на диполи жидкости коэффициент ее вязкости должен возрасти.

Для качественной оценки ориентирующего действия поля воспользуемся дипольной теорией Дебеля, согласно которой можно получить [232]:

$$(\Delta n / n_0)_{\alpha=0} = (n - n_0 / n_0)_{\alpha=0} = \{ \exp[\bar{p}E / (kT)] \}^{-1}, \quad (2.3)$$

где n , n_0 - число молекул, оси которых лежат в определенном телесном угле при наличии поля и при его отсутствии; α - угол, между направлением поля и направлением дипольной оси молекулы; \bar{p} - дипольный момент молекулы; E - поле, действующее на молекулу; $E = (\varepsilon + 2)E / 3$.

Для углеводородного топлива при $E = 10^5$ В/см, $T = 300^\circ \text{C}$, $\varepsilon = 2,2$, $k = 1,37 \cdot 10^{-16}$ из (2.3) имеем: $(\Delta n / n_0)_{\alpha=0} = \exp 0,001 - 1 = 0,0012 = 0,12\%$.

Таким образом, ориентирующее действие постоянного электрического поля оказывает незначительное влияние на величину динамического коэффициента вязкости, а следовательно, на величину потерь ΔH_{11} напора по длине при движении топлива.

Вторую составляющую в уравнении (2.1) $-\Delta H_{12}$ можно вычислить, используя уравнение Борна [232], учитывающее взаимодействие электрического поля с дипольными молекулами жидкости.

В случае течения жидкости через капилляр с кольцеобразным зазором, при приложении к его стенкам постоянного электрического напряжения на основании решения уравнения Борна имеем:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_0} = \frac{\bar{p}(\varepsilon + 2)U / 3}{2kTr_1^2} \frac{[x - (2x \ln x)^{-1}]^2 - 1}{(\ln x)^2 [x^2 - 1 - (x^2 - 1) / \ln x]}, \quad (2.4)$$

где $\Delta\mu$ - изменение динамического коэффициента вязкости при $U \neq 0$; μ_0 - коэффициент вязкости жидкости при $U=0$; U - электрическое напряжение; ε - диэлектрическая проницаемость жидкости. $x = r_2 / r_1 > 1$; r_2 и r_1 - радиусы внешнего и внутреннего электродов.

Для углеводородного топлива при $E = 10^5$ В/см,
 $\bar{p} = 1,2 \cdot 10^{-19}$, $T = 300^\circ \text{C}$, $\varepsilon = 2,2$, $k = 1,37 \cdot 10^{-16}$, $r_2 = 7,9 \cdot 10^{-3}$ м, $r_1 = 6,9 \cdot 10^{-3}$ м,
имеем на основании (2.4) $\Delta\mu / \mu_0 = 0,02\%$.

Таким образом, изменение динамического коэффициента вязкости жидкости под действием постоянного электрического поля незначительно, что отмечается и работе [79].

Влияние переменного однородного электрического поля на вязкость углеводородного топлива (в том числе и авиационного) рассмотрим на примере его влияния на декан, который, входит в химический состав топлива. Относительная диэлектрическая проницаемость декана $\varepsilon \approx 1.2 - 1.4$.

Имеющиеся результаты экспериментальных исследований воздействия переменных однородных электрических полей высоких напряженностей [226] показывают уменьшение вязкости углеводородных жидкостей.

Одной из причин уменьшения вязкости рабочей жидкости являются ионы, возникшие из-за инжекции заряда с электрода и накопление заряда в двойном приэлектродном слое топлива.

По общепринятой модели приэлектродного двойного слоя для инжекции необходимо накопить заряд, по крайней мере, равный полному заряду двойного слоя

$$q = C_{\text{дв}} \cdot U \quad (2.5)$$

где $C_{\text{дв}}$ — емкость двойного слоя, U — падение напряжения на двойном слое. По грубым оценкам, емкость двойного слоя для углеводородных сред составляет $\sim 10 \mu\text{Ф} / \text{м}^2$, а падение напряжения на нем $\sim 1\text{В}$ [233]. В переменном поле заряд и заряд такого двойного слоя осуществляется в течение полупериода ($T/2$) каждого цикла изменения напряжения. Поэтому, чтобы реализовать инжекцию, заряд q должен быть накоплен в слое по крайней мере за четверть периода подаваемого напряжения, то есть

$$q \leq \int_{T/4}^{T/2} i(t) dt, \quad (2.6)$$

где $i(t) = \sigma \cdot E_0 \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t$ — электрический ток; σ — удельная электропроводность рабочей жидкости, E_0 — амплитудная напряженность внешнего электрического поля, f — частота электрического поля.

На основании (2.6) можно получить выражение для критической частоты, при превышении которой в двойном слое не сможет накопиться заряд:

$$f_{cr} = \frac{\sigma \cdot U_{\text{max}}}{2 \cdot \pi \cdot d}, \quad (2.7)$$

где U_{max} — амплитуда приложенного напряжения, d — величина межэлектродного промежутка.

При частоте переменного электрического поля $f > f_{cr}$ инжекция заряда нет, при $f < f_{cr}$ инжекция реализуется.

В эксперименте [226] использовалась установка, которая представляет собой канал прямоугольного сечения длиной 20 мм, шириной 3,5 мм. Верхняя и нижняя стенки канала представляли собой металлические пластины и являлись электродами. Межэлектродное расстояние составляло 200 мкм. Время прохождения жидкости между метками на капилляре измерялось с помощью фоторегистрирующего прибора с точностью до 0,1 с. На электроды экспериментальной ячейки подавалось переменное напряжение от специального источника питания. Диапазон частот используемого напряжения изменялся от 20

Гц до 2 кГц. Погрешность в определении частоты не превышала 3%. Участок капилляра перед ячейкой подбирался такой длины, чтобы по всей длине ячейки течение носило установившийся характер.

Выражение для динамического коэффициента вязкости можно представить в виде

$$\eta = A\Delta P/\Delta Q,$$

где A- аппаратная константа, определяемая конструктивными параметрами прибора; ΔP - перепад давления на капилляре, обеспечивающий расход $\Delta Q = V_0/t$ (V_0 - объем истекающей исследуемой жидкости).

Тогда относительное изменение динамического коэффициента вязкости

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\eta_{el}-\eta}{\eta} = \frac{(t_{el}-t)}{t}, \quad (2.8)$$

где η_{el} - наблюдаемая вязкость при подаче напряжения на ячейку; t_{el} - время истечения жидкости при приложении к жидкости электрического поля, t- время истечения жидкости без электрического поля.

На рисунке 2.2 показано относительное изменение динамического коэффициента вязкости декана (времени протекания жидкости через измерительную ячейку - см. выражение (2.2)) от частоты приложенного напряжения при различных величинах напряженности однородного электрического поля между электродами.

С ростом частоты приложенного напряжения относительная вязкость декана уменьшается. Так, при изменении частоты прикладываемого напряжения в сто раз относительная вязкость падает на $\approx 30\%$, а с ростом величины приложенного напряжения величина $(\Delta\eta/\eta)$ изменяется менее чем в 1,5 раз.

Надо отметить, что при наложении постоянного напряжения на проточную ячейку с неполярными жидкостями значение $(\Delta\eta/\eta)$ также относительно слабо менялось с ростом напряжения [226].

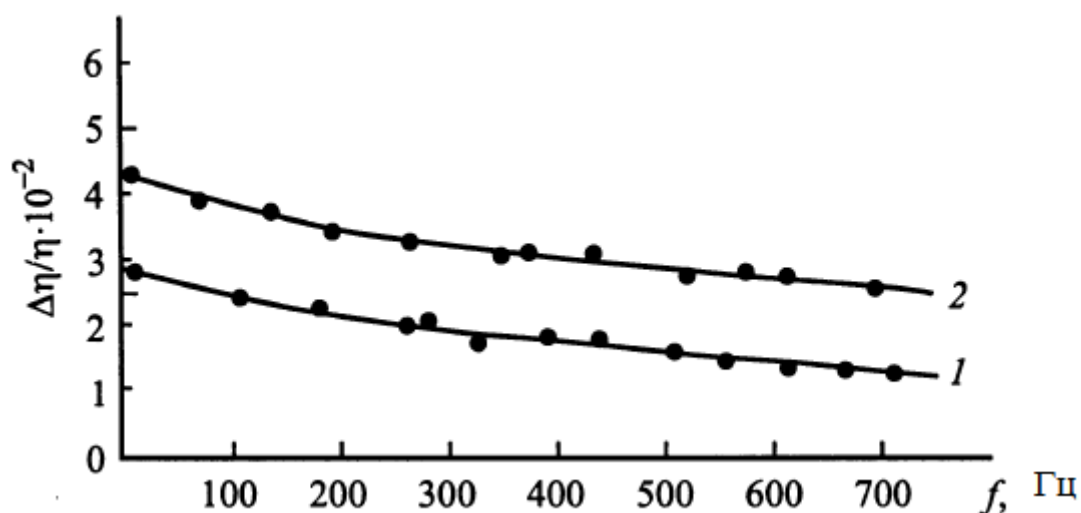


Рисунок 2.2 – Относительное изменение вязкости декана от частоты приложенного переменного электрического поля при различных напряженностях однородного поля между электродами:

1 — 20 кВ/см, 2 — 40 кВ/см

После ”отключения” инъекции наблюдаемая вязкость несколько растет с ростом частоты и имеет слабовыраженный максимум, после чего медленно уменьшается. Подобные изменения могли бы быть обусловлены объемной проводимостью жидкости в результате диссоциации молекул примеси.

При воздействии постоянного продольного к потоку топлива электрического поля, создаваемого между электродами «сетка – сетка» (см. рисунок 2), на которые подается высокое напряжение, как отмечается в работах [250-252], может измениться структура топлива, что приводит к уменьшению гидравлического сопротивления канала протекания топлива. Последнее эквивалентно, по мнению авторов [250 -252], уменьшению эффективной (наблюдаемой) вязкости топлива.

В составе углеводородного топлива (в частности, в авиационном керосине) большую долю занимают углеводороды с химической формулой молекул от $C_{10}H_{20}$ до $C_{15}H_{28}$. Помимо данных соединений, в топливе обычно присутствуют и наночастицы, такие как сера и её соединения, парафиновые частицы и т.д.

Если считать маленькие молекулы в топливе (около 75%) как основную жидкость и остальные около 25% больших молекул и наноразмерные частицы как суспензированные частицы, то топливо можно рассматривать как жидкую суспензию [250 - 252]. База керосина, имеет диэлектрическую постоянную ниже, чем у взвешенных наночастиц, таких как парафиновые частицы, частицы серы и т.д.

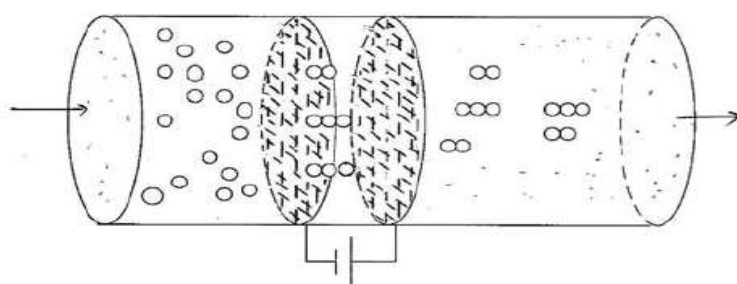


Рисунок 2.3 — К воздействию продольного постоянного электрического поля в топливном канале на эффективную вязкость топлива (кружками обозначены сложные молекулы углеводородов)

На рисунке 2.3 схематично представлен топливный канал (топливо движется слева направо) с находящейся внутри электродной системой в виде двух сеток.

При подаче высокого напряжения на электроды между ними возникает напряженность поля порядка $2 \cdot 10^6$ В/м. Сильное электрическое поле индуцирует взвешенные наночастицы внутри топлива, заставляет агрегировать их в короткие цепочки вдоль направления поля (см. рисунок 2.3). Это объединение нарушает симметрию, что создает анизотропную вязкость по направлению поля. При этом эффективная вязкость топлива значительно снижается. Следовательно, когда сильное электрическое поле прикладывается вдоль направления потока топлива на небольшом участке трубопровода, то взвешенные частицы в топливе поляризуются в электрическом поле. Дипольное взаимодействие быстро агрегирует частицы в виде коротких цепочек вдоль направления поля. При таком состоянии пространственная симметрия нарушается. Вдоль осевого направления,

вязкость снижается к минимуму, поскольку эти агрегаты имеют обтекаемую форму вдоль направления потока. При этом эффективной вязкости топлива уменьшается [251, 252].

Если представлять углеводородное топливо как суспензию с нановключениями, то объёмная концентрация этих включений составляет около 0,5 [251, 252]. При этом вязкость такой суспензии может быть описана при помощи формулы Кригера-Догерти:

$$\eta_{eff}/\eta_0 = (1 - \phi/\phi_{max})^{-v\phi_{max}},$$

где η_{eff} — эффективный коэффициент вязкости суспензии, η_0 — коэффициент вязкости в отсутствии включений, v — внутренняя вязкость включений (например, для сферических включений она равна 5/2), ϕ — объёмная концентрация включений, ϕ_{max} — а максимально возможная концентрация включений (которая зависит от плотности их упаковки, а, следовательно, и от их формы; для сфер $\phi_{max} = 0,64$).

При приложении продольного электрического поля молекулы сложных углеводородов объединяются в кластеры. Внутренняя вязкость таких кластеров уменьшается до значения 2,124 за счёт того, что увеличивается средняя длина пробега этих кластеров (поскольку объёмная концентрация включений практически не меняется, и, следовательно, при объединении включений в более крупные частицы последние получают большую свободу движений. Средняя длина пробега λ оценивается по формуле $\lambda \approx a/(3\phi)$, где a — радиус включений). Также при объединении включений в кластеры меняется форма этих кластеров (они становятся сфероидами [250]), поэтому увеличивается максимально возможная концентрация ϕ_{max} до значения около 0.72. Всё это приводит к тому, что эффективная вязкость суспензии уменьшается.

Поскольку частицы серы обладают гораздо большей диэлектрической проницаемостью, чем жидкие углеводороды, влияние электрического поля на

снижение вязкости высокосернистого углеводородного топлива весьма сильное [250 - 252].

В качестве иллюстрации этого утверждения на рисунке 2.4 представлены экспериментальные данные [250] по измерению вязкости дизельного топлива. Прямая красная линия соответствует вязкости без электрического поля. Черная линия — это зависимость вязкости топлива от времени при воздействии электрическим полем напряжённостью 1кВ/мм в течение 2 секунд. После выключения электрического поля вязкость восстанавливается к своему исходному значению в течение более чем 60 минут.

Из рисунка 2.4 видно, что наиболее сильное уменьшение вязкости жидкого топлива составляет около 10%. Более сильный эффект наблюдается при увеличении напряжённости электрического поля: при значении 2 кВ/мм вязкость уменьшается на 23%.

Авторами [250] использовалась следующая методика измерения вязкости. Внутри контейнера, где располагались электроды, наливалось дизельное топливо. К контейнеру была подсоединена тонкая вертикальная трубка, так что при открытой заслонке топливо могло вытекать из контейнера под действием силы тяжести. Сначала измерялся массовый расход при открытой заслонке без электрического поля. Затем контейнер заполнялся заново, при закрытой заслонке подавалось напряжение в течение небольшого интервала времени, затем электрическое поле отключалось и открывалась заслонка, проводилось измерение массового расхода. Изменение (увеличение) массового расхода во втором случае авторы [250] связывают с уменьшением гидравлического сопротивления при течении топлива по вертикальной трубке, которое в свою очередь связано с уменьшением вязкости топлива, вызванное действием приложенного электрического поля.

Чем ближе к форсунке располагается устройство электрического воздействия на топливо, тем больший эффект увеличения эффективности сгорания топлива вязкости может быть достигнут. Как предполагают авторы

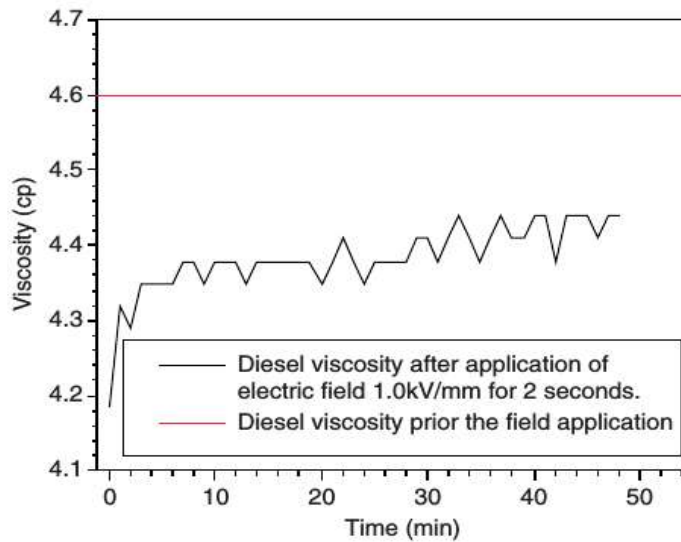


Рисунок 2.4 — Изменение вязкости дизельного топлива (в сП) со временем (в мин) без электрического поля (красная линия) и с его кратковременным воздействием (чёрная линия) [250]

[250], увеличение эффективности сгорания связано с улучшением качества распыла топлива за счёт уменьшения его вязкости. Действительно, при распыле топлива на капли, они при попадании в спутный воздушный поток активно дробятся там вследствие неустойчивости. Степень дробления капель зависит также от значения числа Онезорге Oh , определяемого как

$$Oh = \eta / \sqrt{\rho D \sigma},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; η — динамический коэффициент вязкости; D — диаметр капли. Критическое значение Oh_c , при котором капли перестают дробиться, составляет примерно 0.1, откуда следует, что минимальный размер капель должен быть равен

$$D = \eta^2 / (\rho \sigma Oh_c).$$

Таким образом, при уменьшении вязкости характерный минимальный размер капли топлива значительно уменьшается, что ведёт к интенсификации процессов горения в связи с более быстрым испарением капель топлива в камере сгорания.

2.2 Влияние электрического поля на поверхностное натяжение капель топлива

Сообщение униполярного электрического заряда (знака потенциала острого электрода) в резко неоднородном электрическом поле потокам, струям и каплям диэлектрических жидкостей подтверждено и теоретически и экспериментально [81-91].

Рассмотрим вопрос о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение капель топлива на выходе форсунки. До этого закрученный поток топлива в форсунке проходит через резко неоднородное поле между электродами типа «игла – плоскость» и приобретает объемный униполярный электрический заряд знака потенциала игольчатого электрода. На выходе форсунки униполярно заряженный поток топлива распадается на униполярно заряженные капли.

В процессе распада закрученной струи на выходе форсунки образуются сначала более крупные, а затем мелкодисперсные капли.

Основным физическим механизмом образования капель является неустойчивость струи в потоке воздуха, в частности, и в связи с действием сил поверхностного натяжения. Поэтому вопрос о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение капель является актуальным. При этом учитывается отсутствие в научной литературе и теоретических моделях однозначного ответа на вопрос о влиянии электрического поля на поверхностное натяжение жидкости.

Тем более нет такого ответа применительно к углеводородным топливам при анализе процессов распыла и горения топлива, хотя прежде всего в технически развитых странах усилено занимаются этой проблемой, о чем свидетельствуют сотни патентов. Однако в отдельных научных работах изложены результаты экспериментальных исследований по влиянию электрических полей на физические параметры углеводородного топлива и процессы сгорания топлива в различных двигателях внутреннего сгорания.

Эффект поверхностного натяжения связан с молекулярными силами на границе раздела фаз [253]. Наличие электрического заряда внутри капли при распыле заряженного топлива несколько меняет эти силы. Однако, как показано

во многих теоретических (см., например, [244, 245] и экспериментальных работах, влияние заряда довольно мало. Поверхностное натяжение как молекулярный эффект на границе раздела фаз не так значительно меняется при наличие электрического заряда.

В данной диссертации автором принимается во внимание действие и кулоновской силы при наличии униполярного заряда капли топлива, который теоретически может быть довольно большим. Наличие этой собственной объемной кулоновской силы внутри капли топлива приводит к появлению поверхностной силы, пытающейся разорвать каплю. Таким образом, при наличии заряда в капле топлива получаем два эффекта: изменение собственного поверхностного натяжения (на молекулярном уровне) и возникновению дополнительной поверхностной силы за счет кулоновского взаимодействия униполярных зарядов в капле. Причём второй эффект может быть заметно сильнее первого.

К сожалению, в экспериментах сложно отделить эти два эффекта, к тому же там ещё и есть внешнее электрическое поле. Вот от него попытаемся избавиться, и на то что останется по влиянию униполярного заряда, а также с учетом сложности электрофизических процессов, вводим понятие *эффективный коэффициент поверхностного натяжения капель*.

Эффективный коэффициент поверхностного натяжения униполярно заряженной капли углеводородного топлива характеризует уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли углеводородного топлива прежде всего за счет кулоновских сил относительно поверхностного натяжения незаряженной капли.

При этом рассматривается безразмерная форма отношения эффективного поверхностного натяжения заряженной капли к поверхностному натяжению незаряженной капли. Это отношение записывается как функция отношения текущего заряда капли топлива к критическому заряду капли, который определяется по критерию устойчивости Релея. Исходя из известных физических законов возникновения кулоновских сил униполярно заряженной капли и сил

поверхностного натяжения, рассматривается предельный (на практике, как правило, недостижимый) случай, когда текущий заряд капли будет равен критическому заряду капли по Релею. В этом случае, как известно, капля распадается. То есть силы поверхностного натяжения отдельно взятой капли и кулоновская сила, действующая навстречу силам поверхностного натяжения, будут равны. Гипотетически в данной работе считается, что это соответствует уменьшению эффективного поверхностного натяжения до нуля. Подчёркиваем, что это теоретически возможная (предельная), но практически не выполнимая ситуация.

Таким образом, здесь речь идет об эффективном коэффициенте поверхностного натяжения, под которым понимается суммарный эффект от изменения собственного (молекулярного) поверхностного натяжения за счёт привнесения заряда и возникающей кулоновской силой, которая по сути действует на элемент поверхности капли. При достижении равенства этих сил (то есть когда величина заряда достаточно велика) произойдёт распад заряженной капли (критерий устойчивости Рэля заряженной капли), что можно в первом приближении трактовать как уменьшение эффективного коэффициента поверхностного натяжения до нуля.

Именно так трактуется эффективное поверхностное натяжение и в работах [146, 235, 236], в которых получено для некоторых режимов его уменьшение до величины порядка 0.2 от коэффициента поверхностного натяжения в случае отсутствия заряда.

2.2.1 Модели влияния электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капель

Вопросы о влиянии электрических полей на свойства жидкости и процессы, связанные с её распылом, рассматривался многими исследователями, как теоретически [244, 245], так и, в основном, экспериментально [241 - 243]. В целом, разные исследователи делают вывод о том, что в результате приложения к

диэлектрической жидкости резко неоднородного электрического поля в ней образуется униполярный электрический заряд, который, в свою очередь, влияет на процессы каплеобразования за счёт изменения эффективного коэффициента поверхностного натяжения. Однако, до сих пор ясная и непротиворечивая теория, которая бы давала удовлетворительное согласие с экспериментом, не представлена.

В [246, 136] исследовано влияние электризации топлива на качество смесеобразования применительно к форсункам для двигателей внутреннего сгорания, в частности, исследовалось влияние электрической обработки топливоздушнoй смеси в поле коронного разряда на процесс смесеобразования. В этих работах установлено, что за счёт снижения эффективного поверхностного натяжения бензина в результате электризации капель топлива, улучшается качество распыливания.

В [245] при помощи общей теории термодинамики искривленных поверхностей во внешних полях была выведена формула для коэффициента поверхностного натяжения, учитывающая наличие заряда в капле жидкости и присутствие внешнего электрического поля. Однако, получаемые по этой формуле изменения поверхностного натяжения для типичных значений радиусов образующихся капель ($10 \div 500$ мкм) и максимально возможных зарядов капель (рассчитанных по критерию устойчивости Рэлея для заряженных капель) оказываются пренебрежимо малыми. В свою очередь, в ряде других (экспериментальных) работ отмечается, что влияние заряда на эффективное поверхностное натяжение более значительно.

В основном, при исследовании влияния электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капли, рассматривались только водяные капли. Например, в [254] методом «вытягивания» капель из капилляра под действием внешнего электрического поля (который также использовался в [146] и будет подробно описан далее) экспериментально исследовалось влияние электрического заряда на поверхностное натяжение капель воды диаметром порядка нескольких миллиметров. В [254] получено уменьшение эффективного

поверхностного натяжения до величины около 0.25 от исходного значения коэффициента поверхностного натяжения. При этом рабочее напряжение изменялось до 10 кВ.

Работа [255] посвящена теоретическому вопросу распада капли при зарядах, меньших критических. Отмечается, что при наличии внешнего электрического поля на поверхности капли возникает также индуцированный заряд (в добавлении к переносимому каплей заряду, полученному при контакте жидкости с электродами), поэтому распад капли может наступать даже раньше, чем по критерию устойчивости Рэлея.

Среди большого количества работ, посвящённых исследованию формирования капель под действием электрического поля, можно отметить [97, 234, 239, 240, 256, 257] в которых также рассматриваются вопросы о влиянии электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение и делается вывод о возможном его сильном влиянии. К сожалению, в большей части этих работ в качестве рабочей жидкости рассматривается вода, либо представленные данные противоречивы. В данной работе основной интерес представляет именно влияние электрического заряда в случае углеводородного топлива.

В работах [146, 235, 236] проведены экспериментальные исследования по определению поверхностного натяжения бензина. Топливо (бензин) от бачка постоянного давления поступает к отверстию в жиклере и под действием собственного веса вытекает из него. Жиклер, одновременно являющийся и электродом, выполнен в виде усеченного конуса, на нижней части которого формируются капли. Отрыв капли происходит в тот момент, когда сила тяжести становится равной силе поверхностного натяжения, которая удерживает каплю на электроде, или превысит ее. На расстоянии l от жиклер-электрода размещается кольцевой электрод. Отрывающиеся от жиклер-электрода капли считаются и попадают в мерную бюретку для получения одного и того же объема топлива.

Изменение процесса каплеобразования при приложении электрического поля [146] связано с двумя факторами: во-первых, капля топлива в электрическом поле заряжается, поэтому на неё помимо собственного веса действует

электрическая (кулоновская) сила $F_э$. Во-вторых, заряд капли способствует собственно изменению эффективной силы поверхностного натяжения $F_σ$, которая стремится удержать каплю на жиклер-электроре. Таким образом, отрыв капли происходит в тот момент, когда $F + F_э = F_σ$.

В описываемых экспериментах заряд капли измеряется непосредственно индукционным методом (регистрация заряда с помощью электрометрического измерителя индукционного заряда, возникающего в кольцевом электроре при пролете через него заряженной капли). Как отмечается в [242] этот метод позволяет измерить заряды капель топлива в диапазоне $3 \cdot 10^{-15} \div 3 \cdot 10^{-10}$ Кл. Помимо индукционного способа измерения заряда капель, в работе [146] использовался также и способ с использованием ячейки Фарадея, который подходит как раз для измерения относительно больших зарядов капель, например, таких как 339.7 пКл и 387.3 пКл.

В таблице 2.1 представлены результаты зависимости отношения $\alpha_{эф}/\alpha_0$ (где α_0 — коэффициент поверхностного натяжения в отсутствии электрического поля, а $\alpha_{эф}$ — при его наличии) и отношения заряда капли к кубу радиуса капли q/R^3 от значения приложенного напряжения.

В [146] эти два фактора не разделяются, и считается, что кулоновская сила, возникающая при взаимодействии заряженной капли с внешним электрическим полем, просто изменяет эффективное значение коэффициента поверхностного натяжения $\alpha_{эф}$, поэтому $\alpha_{эф}$ рассчитывается из условия отрыва капли по следующей формуле:

$$\alpha_{эф} = \frac{\rho g V}{2\pi r}$$

Здесь ρ — плотность топлива; g — ускорение свободного падения; V — объём капли; $2\pi r$ — длина окружности нижней части жиклер-электрора (от которого открываются капли).

Таблица 2.1 — Зависимость эффективного поверхностного напряжения бензина от приложенного напряжения по данным [15]

Напряжение U , кВ	$\alpha_{эф}/\alpha_0$	q/R^3 , мКл/м ³
0	1	0
1	0,811	5,87 – 6,33
2	0,681	13,5 – 13,98
2,5	0,523	20.2 – 20.6
4	0,239	32,4 – 32,9

Данная формула следует из равенства сил, которые записываются в виде:

$$F = \rho g V, \quad F_{\sigma} - F_{\gamma} = 2\pi r \alpha_{эф}$$

Поскольку, как предполагается, вне топливной форсунки электрическое поле отсутствует, то необходимо исключить влияние внешнего электрического поля, однако, учесть влияние собственного заряда капли на её эффективное поверхностное натяжение. Для этого оценим величину кулоновской силы F_{σ} , действующей на каплю топлива в электрическом поле, создаваемой используемой в работе [146] электродной системой.

Электрическое поле, создаваемое между электродами [146], является неоднородным (но не резко неоднородным), однако для оценки можно пренебречь этой неоднородностью и считать напряжённость как для случая поля между параллельными пластинами. Расстояние между электродами в эксперименте составляет величину $l = 39$ мм, напряжённость электрического поля E соответственно равна U/l , где U — электрическое напряжение, приложенное к электродам. Обозначим через α_q искомое значение эффективного поверхностного

натяжения заряженной капли топлива без учёта действия кулоновской силы во внешнем электрическом поле. Тогда получим следующее соотношение:

$$2\pi r\alpha_q - qE = 2\pi r\alpha_{y\delta},$$

откуда

$$\frac{\alpha_q}{\alpha_0} = \frac{\alpha_{y\delta}}{\alpha_0} \left(1 + \frac{qE}{2\pi r\alpha_{y\delta}} \right) \quad (2.9)$$

В таблице 2.2 приведены данные из таблицы 2.1, дополненные рассчитанными на основании (2.9) значениями α_q/α_0 .

Следует отметить, что в работе [146] делается также вывод о существовании корреляционной зависимости между эффективным коэффициентом поверхностного натяжения капли топлива и квадратом приложенного напряжения к электродной системе, которая записывается в следующем виде:

$$\frac{\alpha_{y\delta}}{\alpha_0} = 1 - \lambda U^2, \quad (2.10)$$

где λ — эмпирический параметр.

Таблица 2.2 — Сводная таблица, дополненная рассчитанными значениями α_q/α_0

U , кВ	R , мм	q , пКл	q/R^3 , мКл/м ³	$A_{эф}/\alpha_0$	α_q/α_0
0	3.311	0	0	1	1
1	3.088	179.6	6.1	0.811	0.815
2	2.913	339.7	13.74	0.681	0.697
2.5	2.668	387.3	20.4	0.523	0.546
4	2.055	283.3	32.65	0.239	0.266

Аналогичный вывод делается в работе [241], где представлены результаты экспериментов по исследованию влияния заряда на поверхностное натяжение капель воды. В экспериментах использовалась методика, сходная с описанной выше. В работе [241] предлагается использовать следующую формулу для зависимости поверхностного натяжения капель жидкости от электрического напряжения:

$$\frac{\alpha_{y\delta}}{\alpha_0} = 1 - \frac{U^2}{U_{on}^2}, \quad (2.11)$$

где U_{on} — некоторый уровень напряжения.

Наблюдается полное сходство в формулах (2.10) и (2.11), что свидетельствует об одном и том же подходе различных авторов в различных странах к анализу влияния электрического поля на эффективное поверхностное натяжение жидкости. При этом исследования разделены большим промежутком времени. Отметим, что в работе [241] исследовались капли радиусом около 1 мм.

Приведённые в работах [241, 146] данные соответствуют относительно большим размерам капель, тогда как в случае распыла топлива из форсунки образующиеся капли имеют гораздо меньший размер. Однако, проведенные автором [22] эксперименты по определению влияния электрического поля на характеристики горения в реальном двигателе внутреннего сгорания показывают существенное изменение характеристик процессов горения, что связывается в первую очередь с уменьшением размеров капель в результате приложения электрического поля.

Однако механизм влияния электрического заряда капель топлива на характеристики горения топливно-воздушной смеси с каплями малых диаметров в реальном двигателе внутреннего сгорания очень сложный и многофакторный.

Именно поэтому в настоящей диссертации делается попытка получить некоторый безразмерный критерий применительно к эффективному коэффициенту поверхностного натяжения, который можно было бы использовать для экстраполяции в область меньших размеров капель топлива. Предложенный на основании проведенного обзора авторами работы [155] критерий, по их

мнению, является вполне универсальным. И, как показывает обзор литературы, авторы не одиноки в выборе именно такого критерия.

Сильное влияние электрического заряда на поверхностное натяжение также и для субмикронных размеров капель отмечается, в частности, в работе [242], где рассматриваются заряженные капли воды размером от 1 до 100 нм. Ценность данной работы заключается в том, что авторами предложена корреляционная зависимость коэффициента поверхностного натяжения капель от их заряда в безразмерной форме, что открывает возможность применения этой формулы для разных размеров капель и разных жидкостей. Эта формула, полученная из уравнения Липпманна, имеет следующий вид:

$$\frac{\alpha_{y\delta}}{\alpha_0} = \left(1 + 4 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{кр}}} \right)^2 \right)^{-1/2}. \quad (2.12)$$

Здесь σ — плотность поверхностного заряда капли, $\sigma_{\text{кр}}$ — критическая плотность поверхностного заряда, определяемая критерием Рэлея устойчивости заряженной капли. Плотность поверхностного заряда капли определяется как $q/(4\pi R^2)$, где R — радиус капли.

В работе [242] показано, что, по крайней мере, для мелких капель жидкости, предложенная формула даёт хорошее совпадение с экспериментом. При этом отмечается уменьшение относительного коэффициента поверхностного натяжения капель до 30 % при изменении величины Z/R^2 от нуля до 0,027, где Z — количество ионов на поверхности капли.

Несмотря на хорошее совпадение предложенной в [241] формулы (2.12) с экспериментом для $\sigma = \sigma_{\text{кр}}$ она дает уменьшение эффективного коэффициента поверхностного натяжения всего примерно в два раза, хотя при такой критической плотности поверхностного заряда капля не может существовать (она разрывается под действием кулоновских сил). Формально рассуждая, выражение (2.12) должно давать уменьшение эффективного поверхностного натяжения до 0 при $\sigma \rightarrow \sigma_{\text{кр}}$. Тот факт, что эффективное поверхностное натяжение должно уменьшаться до нуля при приближении к критическому заряду капли, следует из

баланса силового равновесия: сила поверхностного натяжения должна уменьшаться за счёт собственной кулоновской силы заряженной капли, то есть с учетом закона Лапласа для сферической капли можно записать:

$$\Delta p = \frac{2\alpha_0}{R} - \frac{q^2}{32\pi^2 \epsilon \epsilon_0 R^4}, \quad (2.13)$$

где Δp — перепад давления между каплей и внешней средой. Второе слагаемое правой части выражения (2.13) представляет собой избыточное давление, создаваемое кулоновской силой, которое действует со стороны заряженной сферы на элемент поверхности этой сферы.

Приведем здесь кратко вывод формулы (2.13).

Будем рассматривать сферический (бесконечно тонкий) слой, по поверхности которого равномерно распределён электрический заряд с известной плотностью σ . Рассмотрим силу Кулона, действующую на выбранный элемент поверхности со стороны какого-либо другого элемента поверхности на сфере. С учётом наличия внутри сферы топлива с диэлектрической проницаемостью ϵ , сила Кулона запишется в виде:

$$\delta^2 \vec{F} = \frac{\sigma^2 \delta S_1 \delta S_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^3} (\vec{r}_1 - \vec{r}_2),$$

где r_1 и r_2 — радиус-векторы двух выбранных элементов на сфере. Учитывая сферическую симметрию задачи, очевидно, что при интегрировании элементарной силы по всей поверхности сферы будет отлична от нуля только радиальная компонента силы Кулона. Тогда, переходя в сферическую систему координат (полярный угол θ), и ведя интегрирование в сферической системе координат (R, θ, φ) , можно записать интеграл для элементарной силы Кулона, действующей на выбранный элемент поверхности со стороны всей сферы:

$$\delta F = \frac{\sigma^2 \delta S_1}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \sin \theta d\theta d\varphi}{(2R \sin(\theta/2))^2} \cos\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right) = \frac{\sigma^2}{2\epsilon \epsilon_0} \delta S_1$$

Отсюда с учётом того, что $\sigma = q/(4\pi R^2)$, следует выражение для давления, создаваемого собственной силой Кулона заряженной сферы:

$$p_q = \frac{\delta F}{\delta S_1} = \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 R^4}.$$

Отметим, что представленную выше формулу можно также получить из формулы для давления на границе раздела двух диэлектриков $p_q = 0.5\varepsilon\varepsilon_0 E^2$ [258], если в качестве напряжённости E подставить выражение для напряжённости кулоновского поля на сфере радиусом R , создаваемой точечным зарядом q , помещённым в центре.

Действие собственной кулоновской силы капли можно также трактовать как уменьшение поверхностного натяжения, то есть ввести величину $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_{\text{эф}}$ следующим образом:

$$\frac{2\Delta\alpha}{R} = \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 R^4},$$

откуда следует

$$\Delta\alpha = \frac{q^2}{64\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 R^3}. \quad (2.14)$$

Критический заряд капли $q_{кр}$ (критерий устойчивости Рэлея) определяется из (2.15) при $\Delta p = 0$:

$$q_{\text{эд}} = \sqrt{64\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 R^3 \alpha_0}. \quad (2.15)$$

Таким образом, можно считать, что всегда имеет место влияние собственной кулоновской силы капли на её эффективное поверхностное натяжение. Поэтому следует ожидать, что корреляционные формулы для α должны давать нулевое значение при q , стремящийся к $q_{кр}$ (или, что то же самое,

при σ , стремящийся к $\sigma_{кр}$). Эффективное поверхностное натяжения вычисляется по формуле: $\alpha_{эф} = \alpha_0 - \Delta\alpha$.

Поделив это выражение на α_0 и воспользовавшись формулами (2.14) и (2.15), получим следующее:

$$\frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} = 1 - \left(\frac{q}{q_{эд}} \right)^2. \quad (2.16)$$

Отметим, что соотношение (2.14) было положено в основу теоретической части работ [75,99,92]. В [26] автором проведено теоретическое исследование уменьшения поверхностного натяжения зараженной капли топлива в зависимости от электрофизических параметров топлива на базе выражения (2.14). Учитывается, что при распыливании горючего в камерах сгорания авиационных двигателей первоначально имеет место полидисперсный поток капель с радиусами $r = (15 - 150)$ мкм и выше, а относительная диэлектрическая проницаемость может меняться в пределах порядка $\varepsilon = (2 - 3)$.

В качестве примера в таблицах 2.3- 2.6 (рисунки 2.5 – 2.8) на базе (2.14) показано влияние электрического заряда на поверхностное натяжение капли при различных диэлектрических проницаемостях и радиусах капель топлива [26].

Как видно из рисунков 2.5 – 2.8 (таблицы 2.3 – 2.6) имеет место существенное уменьшение эффективного поверхностного натяжения заряженной капли горючего по сравнению с незаряженной каплей, что способствует ее разрушению под действием аэродинамических сил. Следовательно, при сообщении заряда каплям горючего повышается эффективность воздействия аэродинамических сил на каплю, что способствует ее разрушению и дроблению на более мелкие капли. Как известно, чем меньше диаметр капли горючего и чем однородней состав горючей смеси, тем эффективнее процесс воспламенения и горения углеводородных топлив и их смесей.

Таблица 2.3 - Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от электрического заряда капли и диэлектрической проницаемости горючего при радиусе капли $r = 15$ мкм [26].

r , мкм	q , нКл	$\Delta\alpha$, Н/м				
		$\varepsilon = 2$	$\varepsilon = 2,2$	$\varepsilon = 2,4$	$\varepsilon = 2,8$	$\varepsilon = 3,0$
15	0	0	0	0	0	0
	2	0,106007	0,09637	0,088339	0,081544	0,070671
	4	0,424027	0,385479	0,353356	0,326174	0,282684
	6	0,95406	0,867327	0,79505	0,733892	0,63604
	8	1,696107	1,541915	1,413422	1,304698	1,130738
	10	2,650167	2,409243	2,208472	2,03859	1,766778

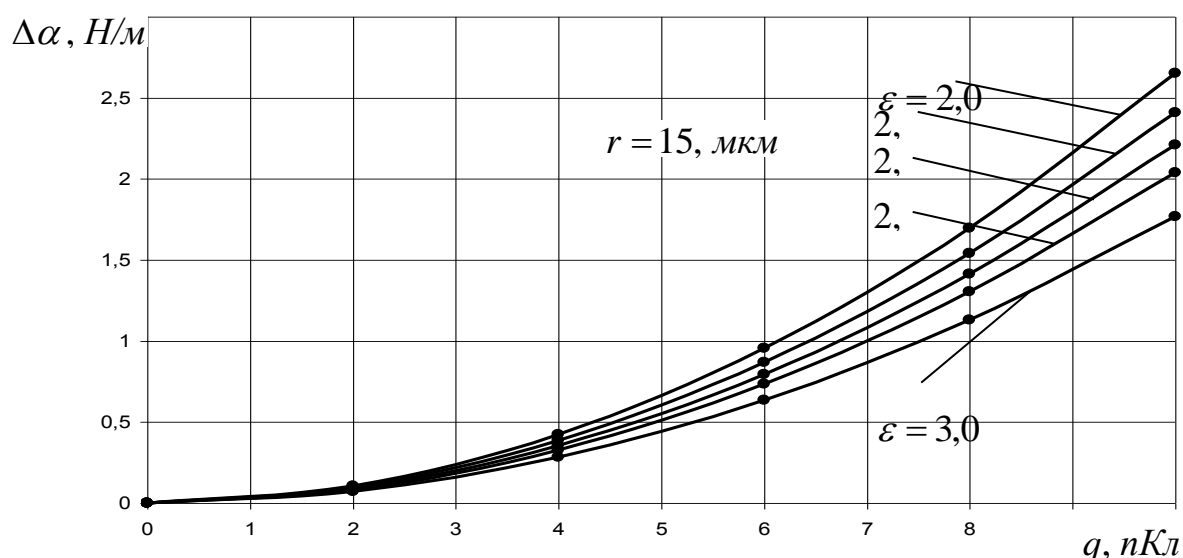


Рисунок 2.5 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от электрического заряда капли и диэлектрической проницаемости горючего при радиусе капли $r = 15$ мкм [26]

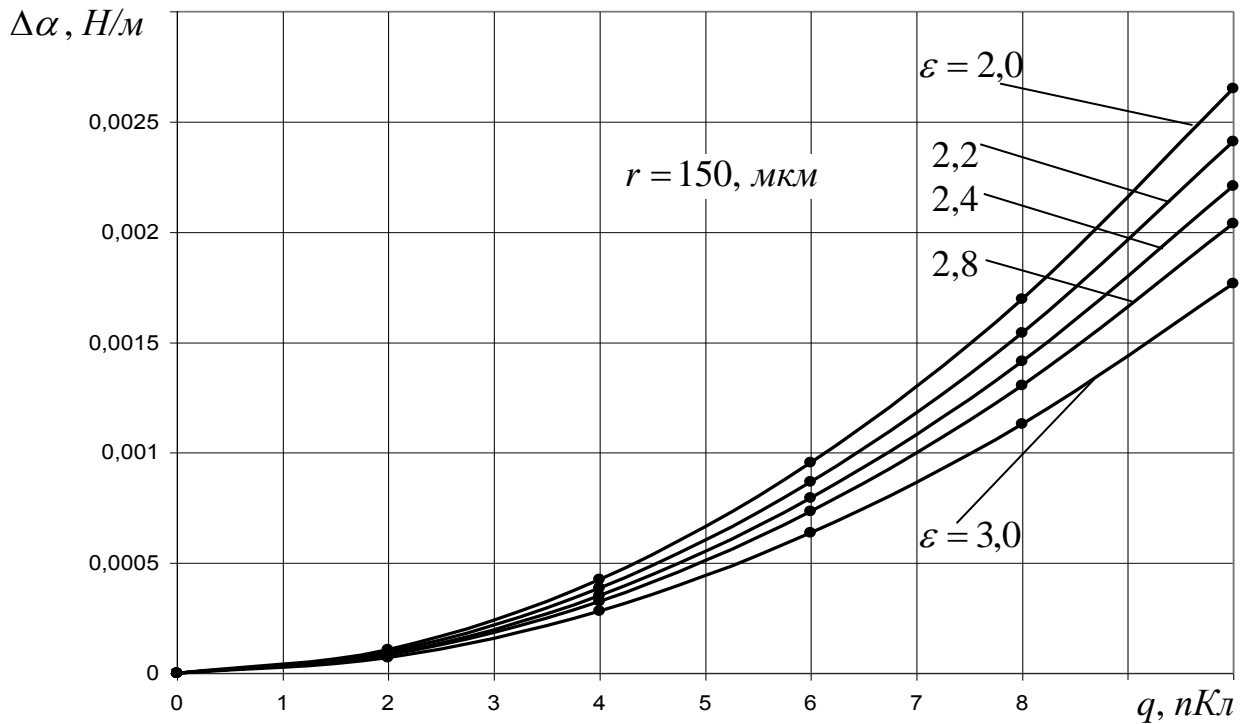


Рисунок 2.6 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от электрического заряда капли и диэлектрической проницаемости горючего при радиусе капли $r = 150$ мкм [26]

Таблица 2.4 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от электрического заряда капли и диэлектрической проницаемости горючего при радиусе капли $r = 150$ мкм [26]

$r, \text{ мкм}$	$q, \text{ нКл}$	$\Delta\alpha, \text{ Н/м}$				
		$\varepsilon = 2$	$\varepsilon = 2,2$	$\varepsilon = 2,4$	$\varepsilon = 2,8$	$\varepsilon = 3,0$
150	0	0	0	0	0	0
	2	0,000106	9,64E-05	8,83E-05	8,15E-05	7,07E-05
	4	0,000424	0,000385	0,000353	0,000326	0,000283
	6	0,000954	0,000867	0,000795	0,000734	0,000636
	8	0,001696	0,001542	0,001413	0,001305	0,001131
	10	0,00265	0,002409	0,002208	0,002039	0,001767

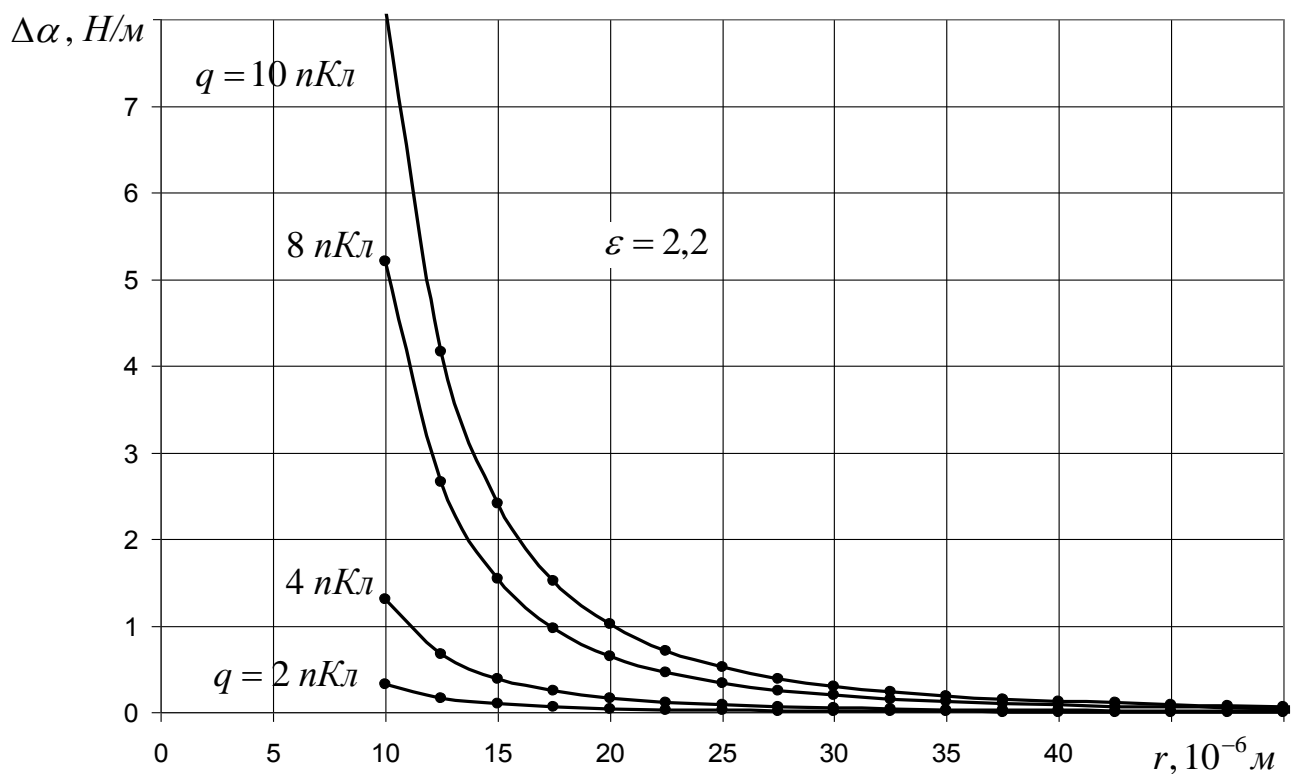


Рисунок 2.7 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от радиуса капли и электрического заряда капли горючего

Таблица 2.5 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от радиуса капли и электрического заряда капли горючего

ϵ	r , мкм	$\Delta\alpha$, Н/м			
		$q = 2$ нКл	$q = 4$ нКл	$q = 8$ нКл	$q = 10$ нКл
2,2	10	0,325248	1,300991	5,203964	8,131194
	15	0,09637	0,385479	1,541915	2,409243
	20	0,040656	0,162624	0,650496	1,016399
	25	0,020816	0,083263	0,333054	0,520396
	30	0,012046	0,048185	0,192739	0,301155
	35	0,007586	0,030344	0,121375	0,189649
	40	0,005082	0,020328	0,081312	0,12705
	45	0,003569	0,014277	0,057108	0,089231
	50	0,002602	0,010408	0,041632	0,06505

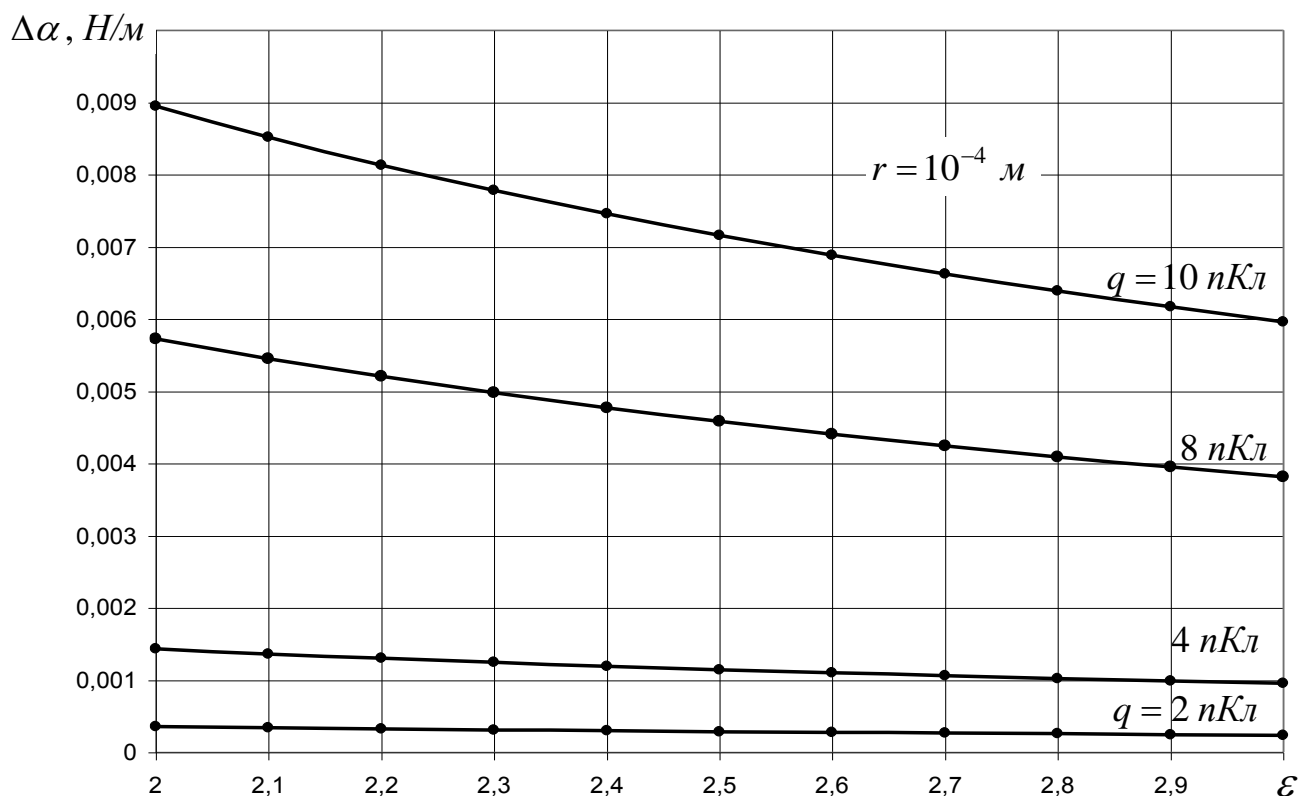


Рисунок 2.8 – Уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли в зависимости от диэлектрической проницаемости горючего

Таблица 2.6 – Данные, соответствующие рисунку 2.8

$r, \text{ мкм}$	ϵ	$\Delta\alpha, \text{ Н/м}$			
		$q = 2 \text{ нКл}$	$q = 4 \text{ нКл}$	$q = 8 \text{ нКл}$	$q = 10 \text{ нКл}$
100	2	0,0003578	0,001431	0,005724	0,008944
	2,1	0,0003407	0,001363	0,005452	0,008518
	2,2	0,0003252	0,001301	0,005204	0,008131
	2,3	0,0003111	0,001244	0,004978	0,007778
	2,4	0,0002981	0,001193	0,00477	0,007454
	2,5	0,0002862	0,001145	0,004579	0,007155
	2,6	0,0002752	0,001101	0,004403	0,00688
	2,7	0,000265	0,00106	0,00424	0,006625
	2,8	0,0002556	0,001022	0,004089	0,006389
	2,9	0,0002467	0,000987	0,003948	0,006168
	3,0	0,0002385	0,000954	0,003816	0,005963

С учетом [99] условие неустойчивого равновесия заряженной капли топлива, движущейся в потоке воздуха при отсутствии внешнего электрического поля, при котором начинается ее разрушение, имеет вид [26]

$$\frac{\gamma_n v_{отн}^2}{2} = \frac{2\alpha}{r} - \frac{q^2}{32 \pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r^4}, \quad (2.17)$$

где $v_{отн}$ – относительная скорость воздуха по отношению к скорости заряженной капли топлива; γ_n – поверхностная плотность капли горючего, $кг/м^2$.

Следовательно, можно заключить, что электрический заряд капель углеводородных топлив уменьшает поверхностное натяжение капель, уменьшает диаметры капель при распыливании топлива. В свою очередь, чем меньше поверхностное натяжение капель горючего и больше способность приобретать свободные электрические заряды, тем меньше сопротивляемость капель топлива разрушающему действию аэродинамических сил при работе двигателей.

Все эти обстоятельства являются предпосылками увеличения эффективности процессов воспламенения и горения углеводородных топлив при сообщении им электрического заряда.

Как известно [90, 164], на каплю можно нанести заряд не более предельного заряда q_{max} , определяемого критерием Рэлея устойчивости заряженной капли рабочей жидкости (2.15).

С учетом [210, 259] можно показать [26], что при выполнении условия (2.15) при сообщении униполярного заряда капле отношения заряда капли к массе m капли предельному их значению будет

$$\frac{q}{m} / \left(\frac{q}{m} \right)_{пред} = \frac{2,8 \cdot 10^4 \gamma d^{3/2}}{\alpha^{1/2} b}, \quad (2.18)$$

где $(q/m)_{пред}$ – предельное отношение заряда к массе капли; d – диаметр капли; α – коэффициент поверхностного натяжения рабочей жидкости; γ – электропроводность рабочей жидкости (топлива); b – подвижность ионов.

Из (2.18) видно, что для получения высокого отношения заряда к массе капли рабочей жидкости электропроводность углеводородных топлив электропроводность γ играет основную роль.

Электропроводность диэлектрических углеводородных топлив составляет порядка $(10^{-14} - 10^{-11}) \text{ I/Om}\cdot\text{м}$. Для сравнения электропроводность предельно чистой перегнанной в вакууме воды при 20 градусах Цельсия составляет $4,85 \cdot 10^{-6} \text{ I/Om}\cdot\text{м}$.

Электропроводность рабочих жидкостей различных двигателей определяет в значительной мере и способ сообщения электрического заряда каплям топлива.

Выбор способа сообщения заряда исследуемым углеводородным топливам зависит, как уже отмечено выше, от их электрофизических параметров и прежде всего от диэлектрической проницаемости, проводимости и поверхностного натяжения.

На основании [91, 88, 90, 164, 87, 25 -26] можно заключить, что для сообщения электрического заряда каплям углеводородных топлив применительно к распылу топлива в форсуночных модулях можно использовать следующие способы:

- зарядка капель в резко неоднородном поле между электродами типа игла – плоскость в поле коронного разряда в воздухе;
- зарядка потоков диэлектрических углеводородных топлив до их распыления на капли созданием непосредственно в потоке резко неоднородного электрического поля.

2.2.2 Обобщенная модель влияния электрического заряда капель топлива на эффективное поверхностное натяжения с валидацией экспериментом

Сравнивая формулы (2.12) и (2.16), можно ожидать, что зависимость эффективного поверхностного натяжения от заряда капли должна иметь следующий вид функциональной зависимости:

$$\alpha_{эф}/\alpha_0 = f(q/q_{кр}).$$

В настоящей работе для данных из таблицы 2.2 получена аппроксимирующая формула (2.19), хорошо совпадающая с результатами экспериментальных исследований для бензинов (см. рисунок 2.9).

На рисунке 2.9 приведён соответствующий график, где символами обозначены экспериментальные данные [146], и приведён график аппроксимационной зависимости для данных из таблицы 2.2, рассчитываемой по формуле:

$$\frac{\alpha_{y\delta}}{\alpha_0} = 1 - 0.67 \left(1 - \sqrt{1 - 5.48 \frac{q}{q_{\delta\delta}}} \right), \quad (2.19)$$

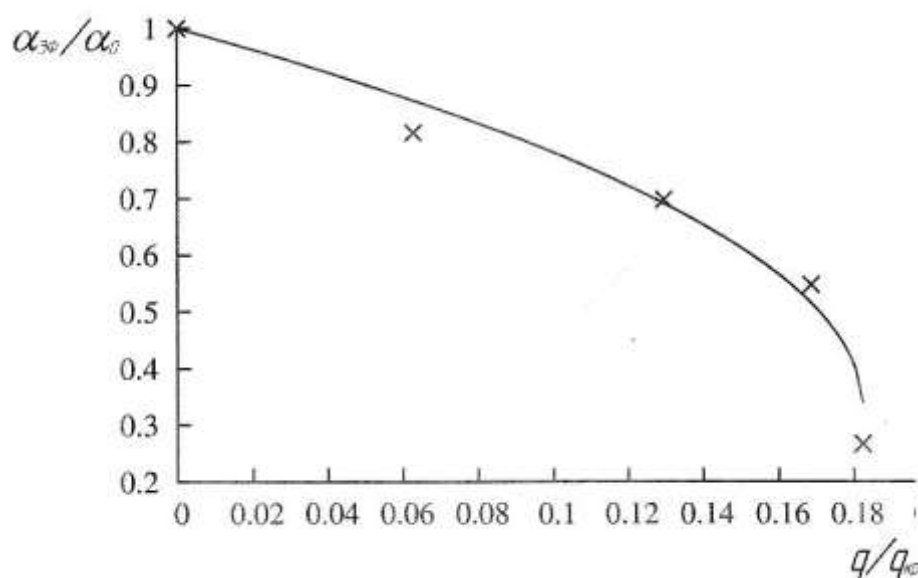


Рисунок 2.9 - Сопоставление экспериментальных данных (X) [146] по влиянию электрического заряда на эффективное поверхностное натяжение капель углеводородного топлива с результатами расчета по полученной формуле (2.19)

Как следует из рисунка 2.9, полученная безразмерная формула зависимости эффективного поверхностного натяжения капли топлива от электрического заряда (2.19) хорошо отображает результаты экспериментов, погрешность аппроксимации составляет не более 5%, что сопоставимо с погрешностью эксперимента (см. таблицу 2.1) и достаточно для инженерных расчетов.

2.3 Исследование метода сообщения электрического заряда каплям углеводородных топлив в резко неоднородном электрическом поле коронного разряда на выходе форсунки

Как уже отмечалось выше, один из путей повышения качества распыла топлива и сгорания керосино-воздушной смеси в авиационных двигателях – использование электрических полей, реализованных в электрическом устройстве воздействия на топливо (ЭУВТ) [1–4]. ЭУВТ может быть включено в цепь питания топливной форсунки [3] или являться конструктивным элементом форсунки (ее электродная часть) [1, 2]. В первом случае конструкция форсунки остается штатной или доработанной с целью обеспечения требуемых параметров распыла топлива [4]. Во втором случае необходимо стремиться к конструктивному решению, при котором при снятии напряжения с электродов форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды - как форсуночный модуль.

Электрическое поле, создаваемое в топливе между электродами ЭУВТ, может быть резко неоднородным переменным [3] или постоянным [1, 2]. В качестве базового типа топливной форсунки принята пневматическая форсунка (см. рисунок 1.5) для камер сгорания богато-бедного типа [47].

Разработаны различные варианты возможных решений по конструкциям форсуночных модулей с целью повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливовоздушной смеси. Если топливу сообщается униполярный электрический заряд [1–3], то в конструкции форсуночных модулей создаются резко неоднородные электрические поля между электродами типа игла – проницаемая для топлива плоскость. При этом резко неоднородные электрические поля можно создавать в ЭУВТ, включенном в цепь питания форсунки перед входом топлива в форсунку [3], непосредственно в топливной форсунке в закрученном потоке топлива после топливного завихрителя при прохождении топлива к распыливающему соплу [1, 2], а также в факеле распыла топливной форсунки на ее выходе. В работах [1,2] показано, что 80 %

инжектируемого в закрученный поток керосина с кольцевого игольчатого электрода (типа заостренная по внутреннему диаметру шайба) электрического заряда выносятся с топливом из форсунки.

В [88] показано, что электрическая емкость электродов ЭУВТ типа игла-плоскость очень невелика, что исключает возможность накопления большого количества электрической энергии, достаточного для образования мощной искры. Кроме того, в ЭУВТ параллельно эквивалентному электрическому сопротивлению нагрузки на выходе электрической схемы подключается шунтирующий резистор, ограничивающий максимальный уровень накапливаемой электрической энергии. В форсуночных модулях отсутствуют подвижные механические элементы, а заряженные капли топлива сгорают в камере сгорания, и продукты сгорания топливовоздушной смеси выбрасываются в атмосферу.

Ниже подробно будут рассмотрены разработанные методы повышения эффективности распыла керосина и сгорания керасино-воздушной смеси с использованием различного типа электрических полей в ЭУВТ как в цепи питания пневматической форсунки, так и в самой форсунке. Здесь же исследуем статику и динамику сообщения в факеле распыла пневматической топливной форсунки на ее выходе [4] каплям углеводородных топлив электрического заряда в резко неоднородном постоянном электрическом поле при коронном разряде. При этом резко неоднородное электрическое поле создается при приложении постоянного высокого электрического напряжения между электродами типа игла – плоскость, где функции иглы выполняет острая кромка распыливающего сопла, а функции плоскости – внутренние стенки внешнего воздушного завихрителя пневматической форсунки для камер сгорания богато-бедного типа [47].

Коронный разряд в газах возникает при определенной, так называемой начальной [4, 260] напряженности $E_{кн}$, индекс «кн» от начальной напряженности короны, которая находится из условия выполнения самостоятельности коронного разряда в воздухе:

$$\int_0^{l_K} \alpha_e dx = \ln \left[\frac{(1 + \gamma_u)}{\gamma_u} \right] \cong K = \text{const} \quad (2.20)$$

когда во внутренней области коронного разряда выполняется неравенство:

$$\alpha_e = \alpha_1 - \alpha_a > 0. \quad (2.21)$$

В выражениях (2.20), (2.21) α_e – эффективный коэффициент ударной ионизации, определяющий процесс размножения электронов в коронирующем слое при ударной ионизации; α_1 – коэффициент ударной ионизации электронами (первый коэффициент ионизации Таунсенда), определяющий число ионизаций электронами на единицу пути при движении их в электрическом поле вдоль силовых линий, равный произведению числа столкновений на единичном пути электрона с молекулами воздуха на вероятность того, что эти столкновения закончатся ионизацией, и зависящий от отношения напряженности электрического поля E к давлению p газа; α_a – коэффициент прилипания, характеризующий процесс образования в коронирующем слое устойчивых отрицательных ионов за счет присоединения атомами и молекулами газа лишнего электрона, который уже теряет способность к ионизации; γ_{ii} – обобщенный коэффициент вторичной ионизации, характеризующий среднее количество электронов, образующихся в пределах коронирующего слоя в результате процессов вторичной ионизации; l_k – длина силовых линий в пределах коронирующего слоя неоднородного электрического поля; x – путь от катода лавины электронов.

Выполнение условия (2.21) соответствует так называемому пороговому значению $(E/p)_п = c$, и, следовательно, самостоятельный разряд в воздухе в факеле распыла топливной форсунки возможен лишь при $E/p \geq c$.

При реализации способа сообщения униполярного электрического заряда каплям топлива в поле коронного разряда расстояния h от острой кромки распыливающего сопла до ближайшей внутренней поверхности внешнего наружного завихрителя пневматической форсунки относительно малы (не более десятков миллиметров). При этом радиус закругления острой кромки распыливающего сопла r_0 составляет $0,5 \cdot 10^{-5} \dots 9 \cdot 10^{-5}$ м.

На основании проведенных исследований для рассматриваемых в данной диссертации приложений получена [260] формула Нагорного для начальной напряженности электрического поля возникновения коронного разряда $E_{\text{кн}}$, дающая хорошее совпадение результатов расчета с результатами экспериментов в указанном диапазоне изменения h и r_0 . Принципиальным отличием от известных формул является учет в данной формуле Нагорного зависимости $E_{\text{кн}}$ от расстояния h между электродами:

$$E_{\text{кн}} = A\rho_0 + B\sqrt{h\rho_0/r_0} . \quad (2.22)$$

где $A = \frac{c p_0 T}{T_0}$; $B = \sqrt{\frac{K p_0 T}{a b_1 T_0}}$.

Коэффициенты a и c находятся [4] из выражения $a_c = pa[(E/p) - c]^2$ вблизи порогового значения $(E/p)_п$, при котором выполняется условие (2.21) самостоятельности коронного разряда.

Относительная плотность ρ_0 воздуха характеризуется выражением $\rho_0 = pT_0/(p_0T)$, где p, p_0 – абсолютные текущее давление и давление воздуха при нормальных атмосферных условиях ($p_0 = 101,3$ кПа, $T_0 = 293$ К); T, T_0 – абсолютные температура газа (воздуха) при p и p_0 .

Коэффициенты a, c находятся экспериментально для данного типа газа, конфигурации электродов и характера напряжения на них.

Коэффициент K определяется из условия (2.20) выполнения самостоятельности коронного разряда в воздухе; b_1 – эмпирический коэффициент, характеризующий расстояние от электрода с малым радиусом кривизны r_0 , в пределах которого до момента возникновения коронного разряда электрическое поле вблизи порогового значения E/p имеет ярко выраженную неоднородность по длине межэлектродного промежутка (максимальный коэффициент усиления).

При аппроксимации электродной системы сообщения электрического заряда каплям топлива софокусными гиперболами вращения получено выражение для границы x_k , внутренней области короны, вне которой имеет место

униполярный поток ионов знака потенциала острого электрода (острой кромки распыливающего сопла)

$$x_k = h - \left[(h^2 + r_0 h) - 2U \sqrt{h^2 + r_0 h} / \left(c' \rho_0 \ln \frac{\sqrt{h^2 + r_0 h} + h}{\sqrt{h^2 + r_0 h} - h} \right) \right]^{0,5}, \quad (2.23)$$

где h – расстояние между электродами; $c' = c\rho_0$. При нормальных атмосферных условиях для воздуха $c' = 24,11 \cdot 10^3$ В/см.

Для сравнительного анализа полученного выражения для начальной напряженности возникновения униполярного потока ионов с известными выражениями, полученными, как правило, для коаксиальных электродов, запишем выражение (2.22) для коаксиальных электродов, аппроксимируя внутреннюю поверхность внешнего воздушного завихрителя соответствующей полуокружностью радиусом R :

$$E_{кн} = A\rho_0 + B \sqrt{[(R/r_0) - 1] \rho_0}, \quad (2.24)$$

где R – радиус закругления некоронирующего электрода.

Например, для $R = 5$ мм в диапазоне изменения r_0 $0,5 \cdot 10^{-5} \dots 9,0 \cdot 10^{-5}$ м в выражении (2.24) для воздуха коэффициенты $A = 34,2$ кВ/см, $B = 0,345$ кВ/см.

Расчеты $E_{кн}$ по полученному выражению (2.24), найденному из формулы Нагорного (3), наиболее точно совпадают с экспериментальными данными во всем диапазоне возможных радиусов закругления $r_0 = (0,5 \div 9) 10^{-5}$ м коронирующего острия кромки распыливающего сопла для таких модельных коаксиальных цилиндров при указанных малых межэлектродных расстояниях, при которых внутренняя область коронного разряда, где $\alpha_e > 0$, становится соизмеримой с расстоянием между электродами [88]. Расчеты по формулам Пика, Таунсенда, Леша, Александрова, Энгеля и Штенбека, не учитывающим зависимость $E_{кн}$ от расстояния между электродами при таких малых межэлектродных промежутках, дают большие расхождения с экспериментальными данными [260].

Величина начального электрического напряжения короны $U_{\text{кн}}$ для коаксиальных электродов определяется из выражения (2.24) по формуле:

$$U_{\text{кн}} = E_{\text{кн}} r_0 \ln(R/r_0). \quad (2.25)$$

На основании формулы Потенье для сообщаемого электрического заряда капле топлива в поле коронного разряда имеем [4]:

$$q(t) = \frac{12\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2 r^2 e n_0 b E_k}{(4\varepsilon_0 + e n b t)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)} t, \quad (2.26)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума (электрическая постоянная); ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость топлива; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость окружающей каплю топлива среды (для воздуха $\varepsilon_2 = 1$); r – радиус капли топлива, м; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; n_0 – средняя концентрация ионов по всему межэлектродному промежутку; b – подвижность ионов, м²/В·с; E_k – средняя напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке при коронном разряде, м/В; n – концентрация электронов в поле коронного разряда; t – время нахождения капли топлива в поле коронного разряда, зависящее от скорости капли в межэлектродном промежутке.

Выражение (2.26) можно переписать в виде [4]:

$$q(t) = \frac{q_{\text{max}} e n_0 b t}{(4\varepsilon_0 + e n b t)}, \quad (2.27)$$

где

$$q_{\text{max}} = \frac{12\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2 r^2 E_k}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)} \quad (2.28)$$

максимальный электрический заряд капли топлива в поле коронного разряда.

При функционировании форсуночных модулей в различных авиационных двигателях могут использоваться те или иные сорта топлива с различными диэлектрическими проницаемостями. В свою очередь, при распыле топлива форсункой имеем топливный факел капель различных диаметров. Поэтому были

проведены исследования динамики сообщения электрического заряда каплям топлива различных диаметров с различной диэлектрической проницаемостью.

Получены соответствующие зависимости сообщаемого в поле коронного разряда капле топлива электрического заряда в функции от радиуса капли, диэлектрической проницаемости топлива, подвижности униполярных ионов при отрицательной и положительной коронах (положительном и отрицательном потенциалах напряжения на острой кромке распыливающего сопла). Также получены значения средней напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке при коронном разряде.

Средняя концентрация ионов по всему межэлектродному промежутку при коронном разряде в соответствии с работой [166] будет составлять $n_0 = 10^{14}$ ион/м³, поэтому в первом приближении, принимая в выражении (2.26) $n_0 = n = 10^{14}$ ион/м³, для воздуха ($\epsilon_2 = 1$) выражение (2.26) переписываем в виде:

$$q(t) = \frac{533,82 \cdot 10^{-17} \epsilon_1 r^2 b E_k t}{(35,4 \cdot 10^{-12} + 1,6 \cdot 10^{-5} b t)(\epsilon_1 + 2)}. \quad (2.29)$$

При **отрицательном потенциале острой кромки распыливающего сопла** во внешней области коронного разряда между соплом и внутренней стенкой внешнего воздушного завихрителя будет иметь место униполярный поток отрицательных ионов. Подвижность отрицательных ионов в воздухе равна [88,166] $b^- = 1,4 \cdot 10^{-4}$ м²/(В с).

Тогда выражение (2.29) переписывается в виде:

$$q(t) = \frac{960,87 \cdot 10^{-21} \epsilon_1 r^2 E_k t}{(35,4 \cdot 10^{-12} + 2,88 \cdot 10^{-9} t)(\epsilon_1 + 2)}. \quad (2.30)$$

Для **сообщения положительного электрического заряда каплям топлива** подают на острую кромку распыливающего сопла положительный потенциал. В этом случае во внешней области коронного разряда между соплом и внутренней стенкой внешнего воздушного завихрителя будет иметь место униполярный поток

положительных ионов. Подвижность положительных ионов в воздухе [88,260]
 $b^+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$.

Тогда выражение (2.29) переписывается в виде [4]:

$$q(t) = \frac{747,35 \cdot 10^{-21} \varepsilon_1 r^2 E_k t}{(35,4 \cdot 10^{-12} + 2,24 \cdot 10^{-9} t)(\varepsilon_1 + 2)}. \quad (2.31)$$

Ниже представлены полученные соответствующие зависимости динамики сообщаемого в поле коронного разряда капле углеводородного топлива электрического заряда в функции от радиуса капли, диэлектрической проницаемости углеводородного топлива, подвижности униполярных ионов при отрицательной и положительной короне (положительном и отрицательном потенциале напряжения на игольчатом электроде). Результаты которых представлены ниже на рисунках 2.10 – 2.21. В таблицах 2.7 – 2.18 приведены соответствующие числовые данные для каждого из рисунков 2.10 – 2.21.

2.3.1 Исследование метода сообщения отрицательного электрического заряда каплям углеводородных топлив в электрическом поле коронного разряда при отрицательном потенциале игольчатого электрода

В этослучае во внешнем области коронного разряда будет иметь место униполярный поток отрицательных ионов с подвижностью

$$b^- = 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

Динамическая характеристика сообщения отрицательного заряда каплям топлива описывается выражением (2.30).

На рисунках 2.10 – 2.15 и в соответствующих им таблицам 2.7 – 2.12 представлены результаты исследований сообщения отрицательного электрического заряда каплям диэлектрических углеводородных топлив в электрическом поле отрицательного коронного разряд в воздухе.

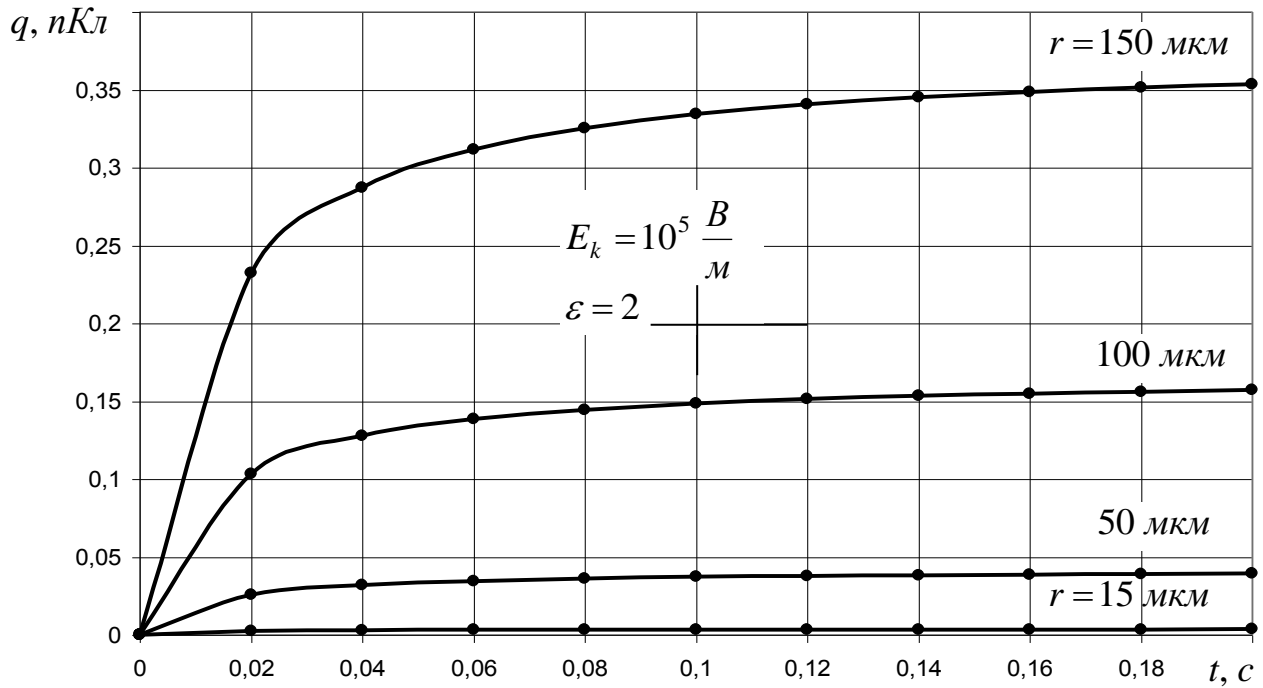


Рисунок 2.10 – Динамика сообщения электрического заряда каплям различных размеров в поле отрицательного коронного разряда при относительной диэлектрической проницаемости углеводородного топлива $\epsilon_1 = \epsilon = 2$ [4]

Таблица 2.7 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.10

T, c	$q, \text{nКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002325	0,02583	0,10332	0,23247
0,04	0,002871	0,031902	0,127606	0,287114
0,06	0,003115	0,034614	0,138455	0,311523
0,08	0,003254	0,03615	0,144601	0,325353
0,1	0,003343	0,03714	0,148558	0,334256
0,12	0,003405	0,03783	0,151319	0,340467
0,14	0,00345	0,038339	0,153354	0,345047
0,16	0,003486	0,038729	0,154917	0,348564
0,18	0,003513	0,039039	0,156155	0,351349
0,2	0,003536	0,03929	0,15716	0,35361

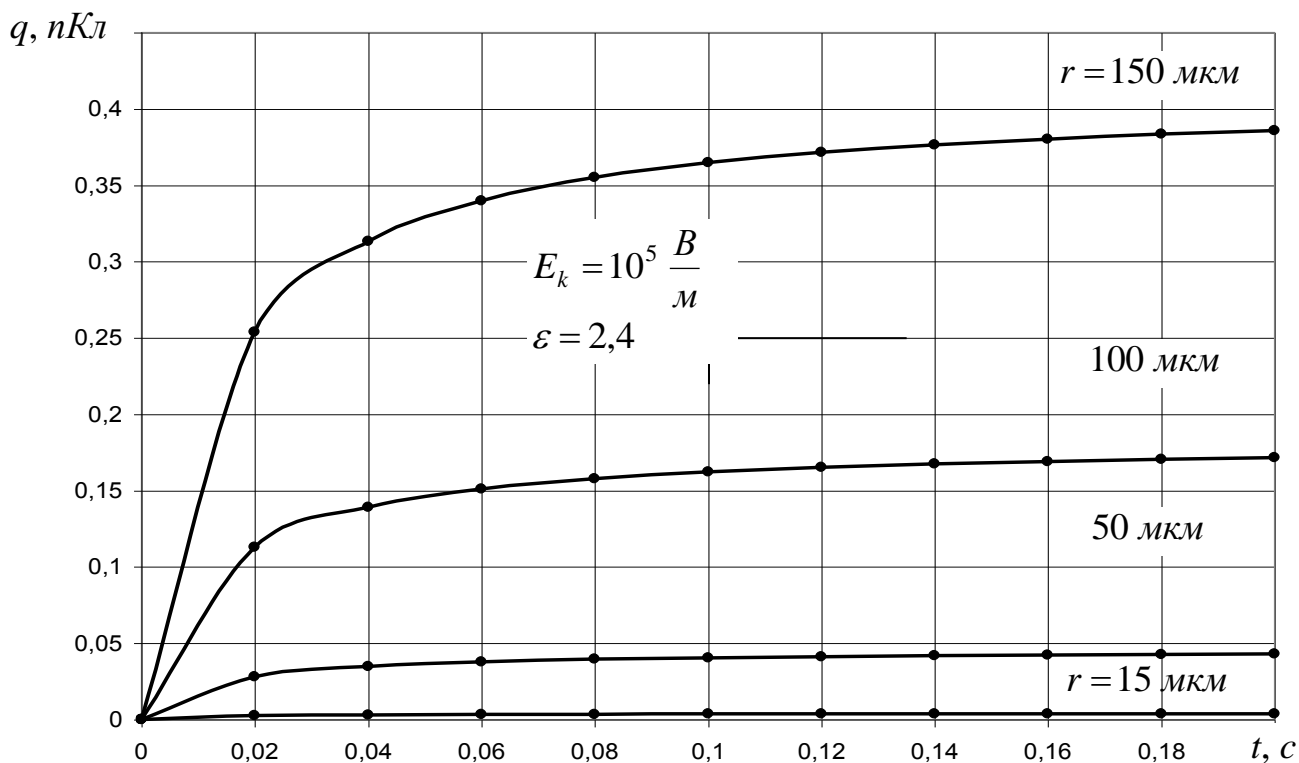


Рисунок 2.11 – Динамика сообщения отрицательного электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле отрицательного коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 2,4$

Таблица 2.8 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.11

T, c	$q, \text{нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002536	0,028178	0,112713	0,253603
0,04	0,003132	0,034802	0,139207	0,313215
0,06	0,003398	0,03776	0,151041	0,339843
0,08	0,003549	0,039437	0,157747	0,35493
0,1	0,003646	0,040516	0,162064	0,364643
0,12	0,003714	0,041269	0,165075	0,371419
0,14	0,003764	0,041824	0,167296	0,376415
0,16	0,003803	0,04225	0,169001	0,380252
0,18	0,003833	0,042588	0,170351	0,38329
0,2	0,003858	0,042862	0,171447	0,385756

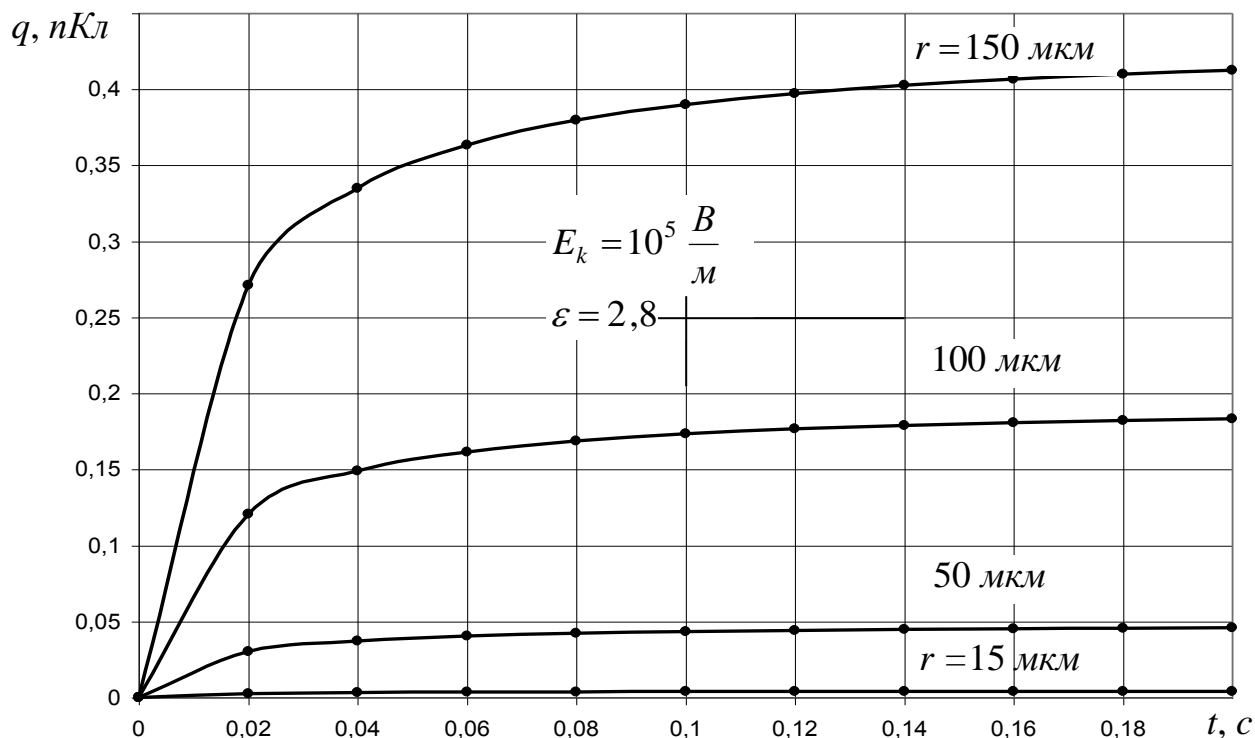


Рисунок 2.12 – Динамика сообщения отрицательного электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле отрицательного коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 2,8$

Таблица 2.9 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.12

t, c	$q, nКл$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002712	0,030135	0,12054	0,271215
0,04	0,00335	0,037218	0,148874	0,334966
0,06	0,003634	0,040383	0,16153	0,363443
0,08	0,003796	0,042175	0,168701	0,379578
0,1	0,0039	0,043329	0,173318	0,389965
0,12	0,003972	0,044135	0,176539	0,397212
0,14	0,004026	0,044728	0,178913	0,402555
0,16	0,004067	0,045184	0,180737	0,406658
0,18	0,004099	0,045545	0,182181	0,409907
0,2	0,004125	0,045838	0,183353	0,412544

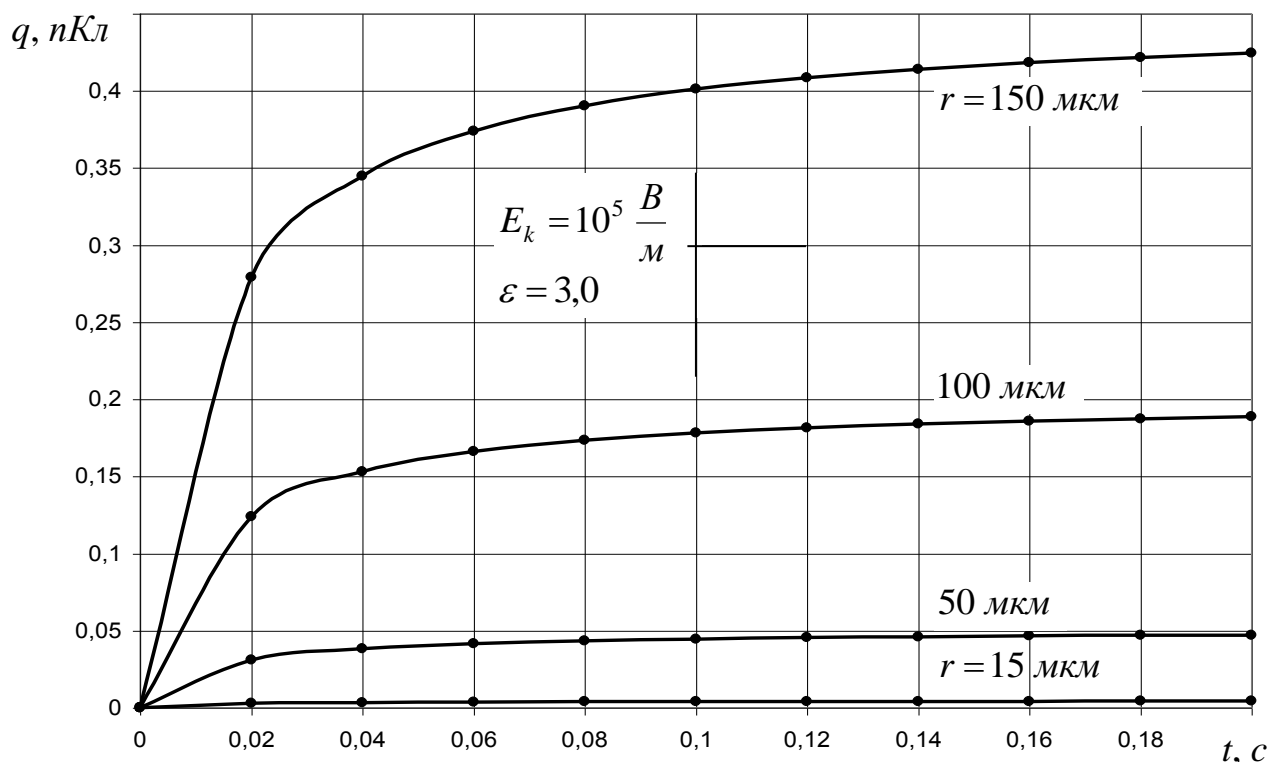


Рисунок 2.13 – Динамика сообщения отрицательного электрического заряда каплям топлив различных размеров в поле коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 3,0$

Таблица 2.10 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.13

t, c	$q, \text{нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,00279	0,030996	0,123984	0,278964
0,04	0,003445	0,038282	0,153127	0,344537
0,06	0,003738	0,041536	0,166146	0,373827
0,08	0,003904	0,04338	0,173521	0,390423
0,1	0,004011	0,044567	0,17827	0,401107
0,12	0,004086	0,045396	0,181583	0,408561
0,14	0,004141	0,046006	0,184025	0,414057
0,16	0,004183	0,046475	0,185901	0,418277
0,18	0,004216	0,046847	0,187386	0,421619
0,2	0,004243	0,047148	0,188592	0,424331

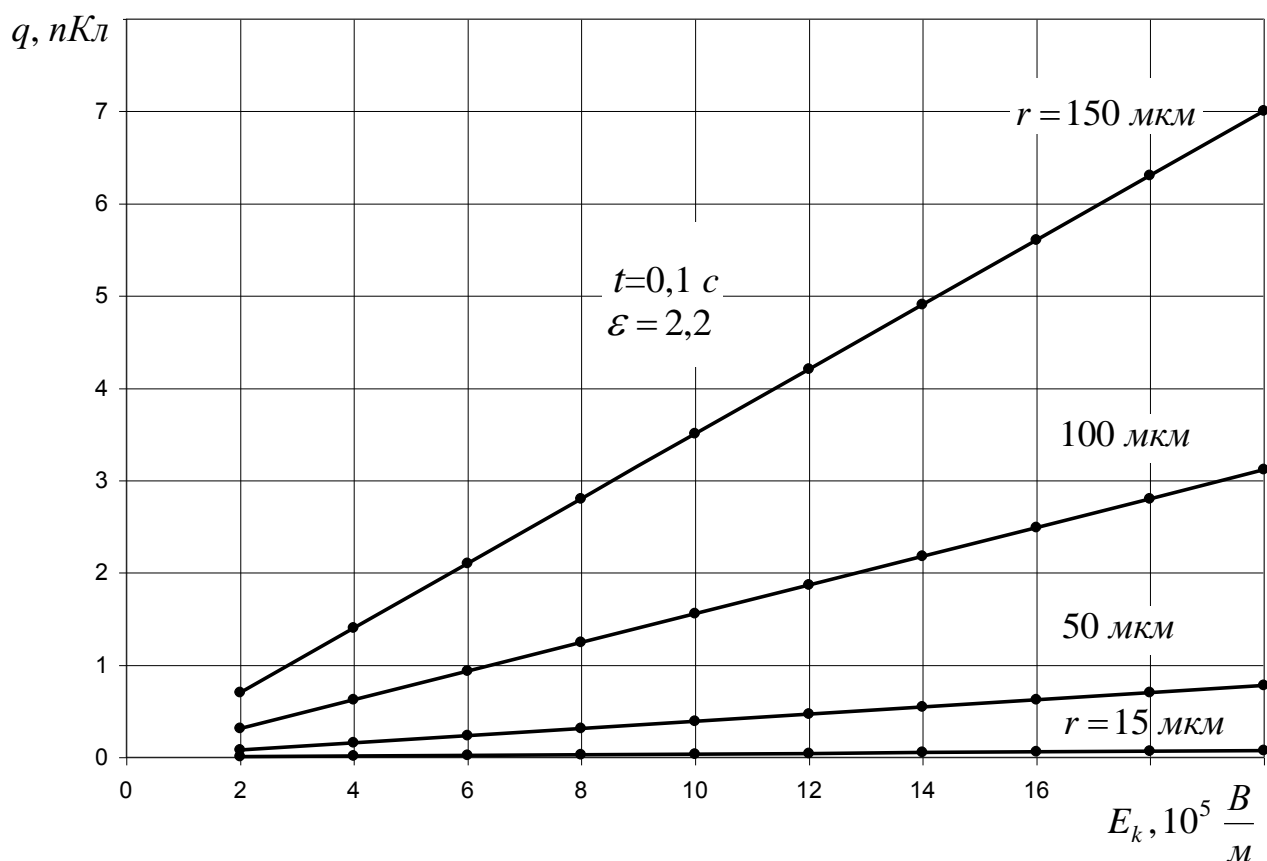


Рисунок 2.14 – Влияние напряженности поля отрицательного коронного разряда на заряд каплей горючего при $t = 0,1 \text{ c}$ и $\epsilon_1 = \epsilon = 2,2$ [4]

Таблица 2.11 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.14

$E_k,$ 10^5 В/м	$q, \text{ нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
2	0,007003	0,077816	0,311265	0,700346
4	0,014007	0,155632	0,62253	1,400692
6	0,02101	0,233449	0,933795	2,101038
8	0,028014	0,311265	1,24506	2,801385
10	0,035017	0,389081	1,556325	3,501731
12	0,042021	0,466897	1,86759	4,202077
14	0,049024	0,544714	2,178855	4,902423
16	0,056028	0,62253	2,49012	5,602769
18	0,063031	0,700346	2,801385	6,303115
20	0,070035	0,778162	3,112649	7,003461

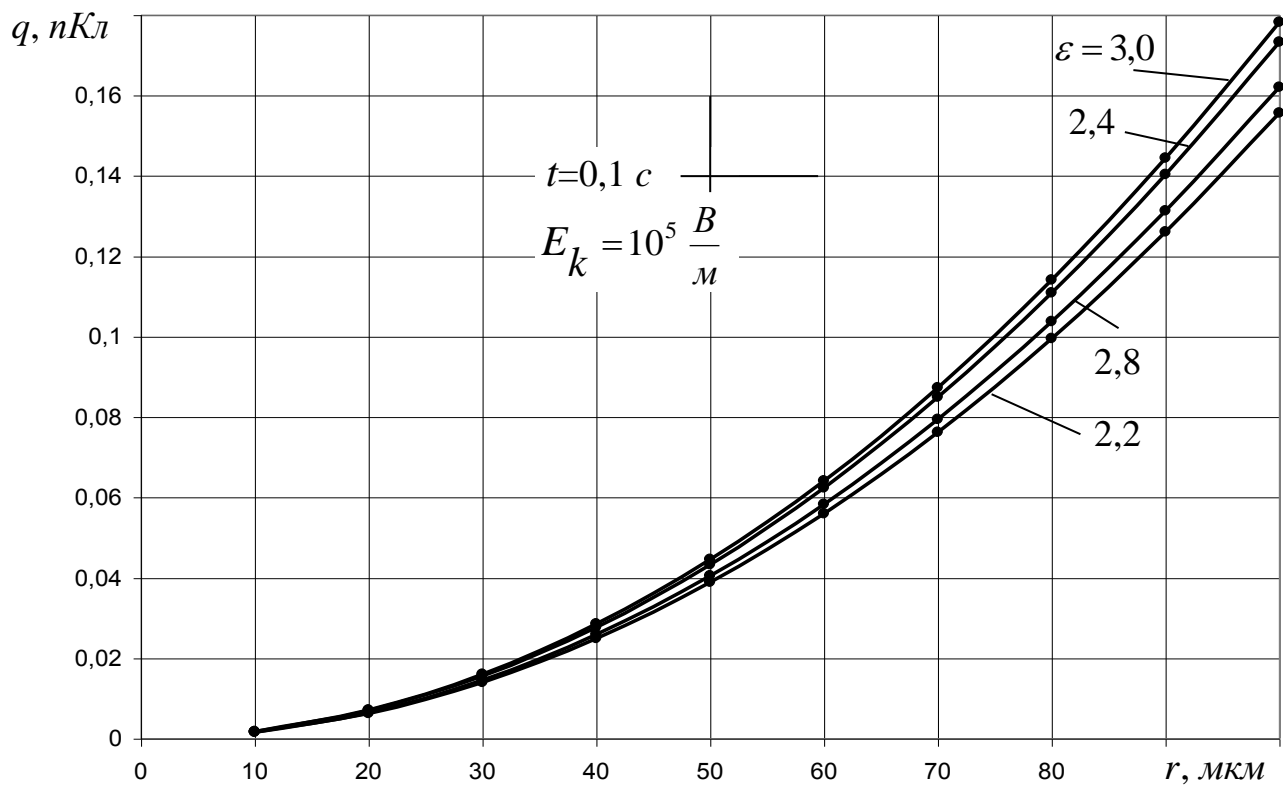


Рисунок 2.15 – Влияние радиуса капли и диэлектрической проницаемости углеводородного топлива на отрицательный заряд каплей в поле отрицательного коронного разряда при $t = 0,1 \text{ c}$ [4]

Таблица 2.12–Численные данные, соответствующие рисунку 2.15

$R, \text{ мкм}$	$q, \text{ нКл}$			
	$\epsilon = 2,2$	$\epsilon = 2,4$	$\epsilon = 2,8$	$\epsilon = 3,0$
10	0,001556	0,001621	0,001733	0,001783
20	0,006225	0,006483	0,006933	0,007131
30	0,014007	0,014586	0,015599	0,016044
40	0,024901	0,02593	0,027731	0,028523
50	0,038908	0,040516	0,043329	0,044567
60	0,056028	0,058343	0,062394	0,064177
70	0,07626	0,079411	0,084926	0,087352
80	0,099605	0,103721	0,110924	0,114093
90	0,126062	0,131271	0,140388	0,144399
100	0,155632	0,162064	0,173318	0,17827

2.3.2 Исследование метода сообщения положительного электрического заряда каплям углеводородных топлив в электрическом поле коронного разряда при положительном потенциале игольчатого электрода

В этом случае во внешней области коронного разряда будет иметь место униполярный поток положительных ионов с подвижностью:

$$b^+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{B \cdot c}.$$

Динамическая характеристика сообщения положительного заряда каплям топлива описывается выражением (2.31).

На рисунках 2.16 – 2.21 и в соответствующих им таблицах 2.13 – 2.18 в соответствии с (2.31) представлены результаты исследований сообщения положительного электрического заряда каплям диэлектрических углеводородных топлив в электрическом поле положительного коронного разряд в воздухе.

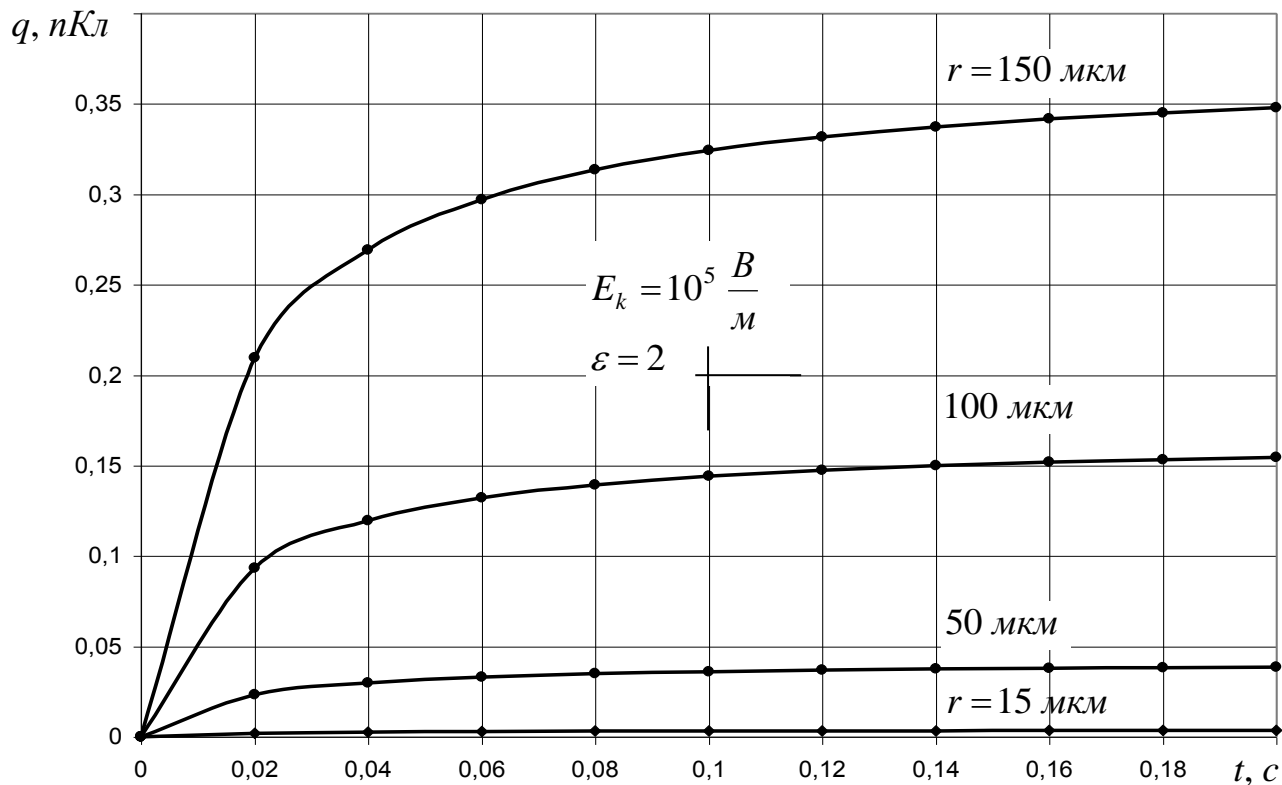


Рисунок 2.16 – Динамика сообщения электрического заряда каплям различных размеров в поле положительного коронного разряда при относительной диэлектрической проницаемости углеводородного топлива $\epsilon_1 = \epsilon = 2$ [4]

Таблица 2.13 – Динамика сообщения электрического заряда каплям различных размеров в поле положительного коронного разряда при относительной диэлектрической проницаемости углеводородного топлива $\epsilon_1 = \epsilon = 2$

T, c	$q, \text{ нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002097	0,023296	0,093185	0,209667
0,04	0,00269	0,029894	0,119576	0,269045
0,06	0,002971	0,03301	0,13204	0,29709
0,08	0,003134	0,034825	0,139301	0,313426
0,1	0,003241	0,036013	0,144053	0,324119
0,12	0,003317	0,036851	0,147406	0,331663
0,14	0,003373	0,037474	0,149898	0,33727
0,16	0,003416	0,037956	0,151823	0,341601
0,18	0,00345	0,038339	0,153354	0,345047
0,2	0,003479	0,038651	0,154602	0,347855

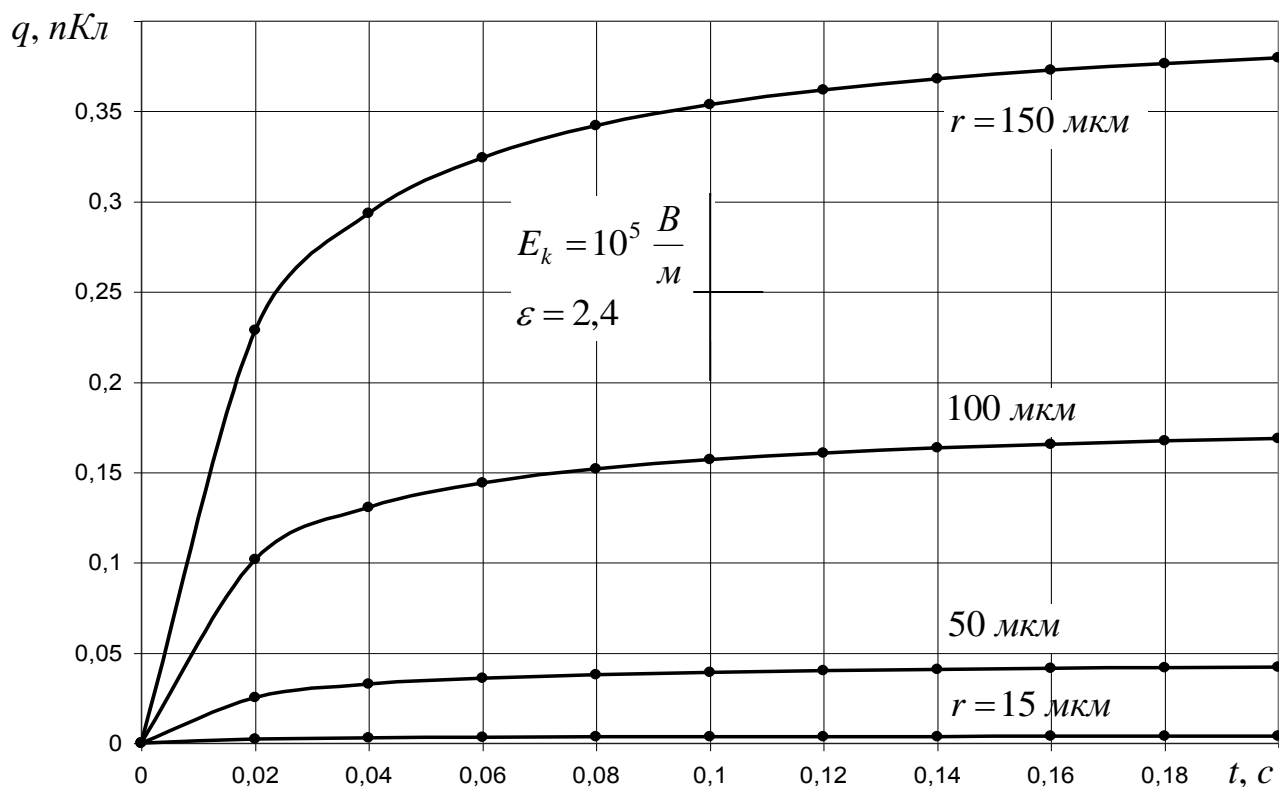


Рисунок 2.17 – Динамика сообщения положительного электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 2,4$

Таблица 2.14 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.17

T, c	$q, \text{нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002287	0,025414	0,101657	0,228728
0,04	0,002935	0,032612	0,130446	0,293504
0,06	0,003241	0,036011	0,144044	0,324099
0,08	0,003419	0,037991	0,151964	0,341919
0,1	0,003536	0,039287	0,157149	0,353585
0,12	0,003618	0,040202	0,160806	0,361814
0,14	0,003679	0,040881	0,163525	0,367931
0,16	0,003727	0,041406	0,165625	0,372656
0,18	0,003764	0,041824	0,167296	0,376415
0,2	0,003795	0,042164	0,168657	0,379478

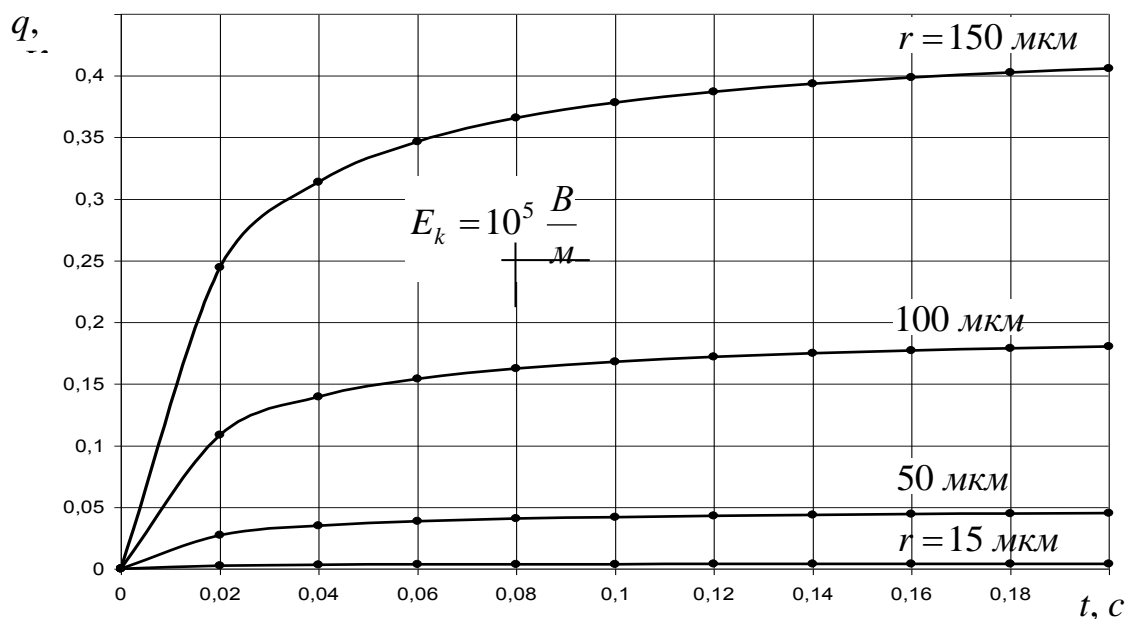


Рисунок 2.18 – Динамика сообщения положительного электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле положительного коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 2,8$

Таблица 2.15 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.18

T, c	$q, \text{ нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002446	0,027179	0,108716	0,244612
0,04	0,003139	0,034876	0,139505	0,313886
0,06	0,003466	0,038512	0,154047	0,346605
0,08	0,003657	0,040629	0,162517	0,365664
0,1	0,003781	0,042015	0,168062	0,378139
0,12	0,003869	0,042993	0,171973	0,38694
0,14	0,003935	0,04372	0,174881	0,393482
0,16	0,003985	0,044282	0,177126	0,398535
0,18	0,004026	0,044728	0,178913	0,402555
0,2	0,004058	0,045092	0,180369	0,405831

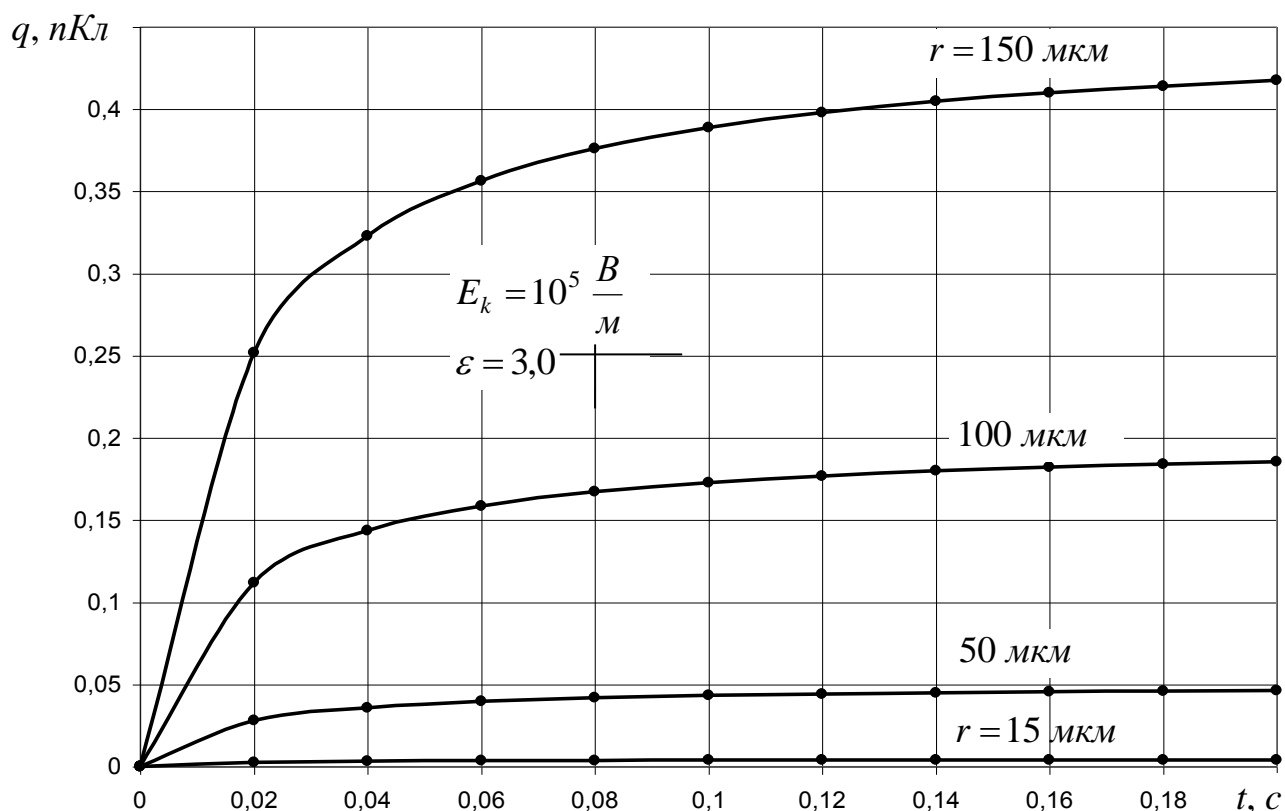


Рисунок 2.19 – Динамика сообщения положительного электрического заряда каплям топлив различных размеров в поле коронного разряда при $\varepsilon_1 = \varepsilon = 3,0$

Таблица 2.16 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.19

t, c	$q, \text{нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
0	0	0	0	0
0,02	0,002516	0,027956	0,111823	0,251601
0,04	0,003229	0,035873	0,143491	0,322854
0,06	0,003565	0,039612	0,158448	0,356508
0,08	0,003761	0,04179	0,167161	0,376111
0,1	0,003889	0,043216	0,172864	0,388943
0,12	0,00398	0,044222	0,176887	0,397996
0,14	0,004047	0,044969	0,179877	0,404724
0,16	0,004099	0,045547	0,182187	0,409921
0,18	0,004141	0,046006	0,184025	0,414057
0,2	0,004174	0,046381	0,185523	0,417426

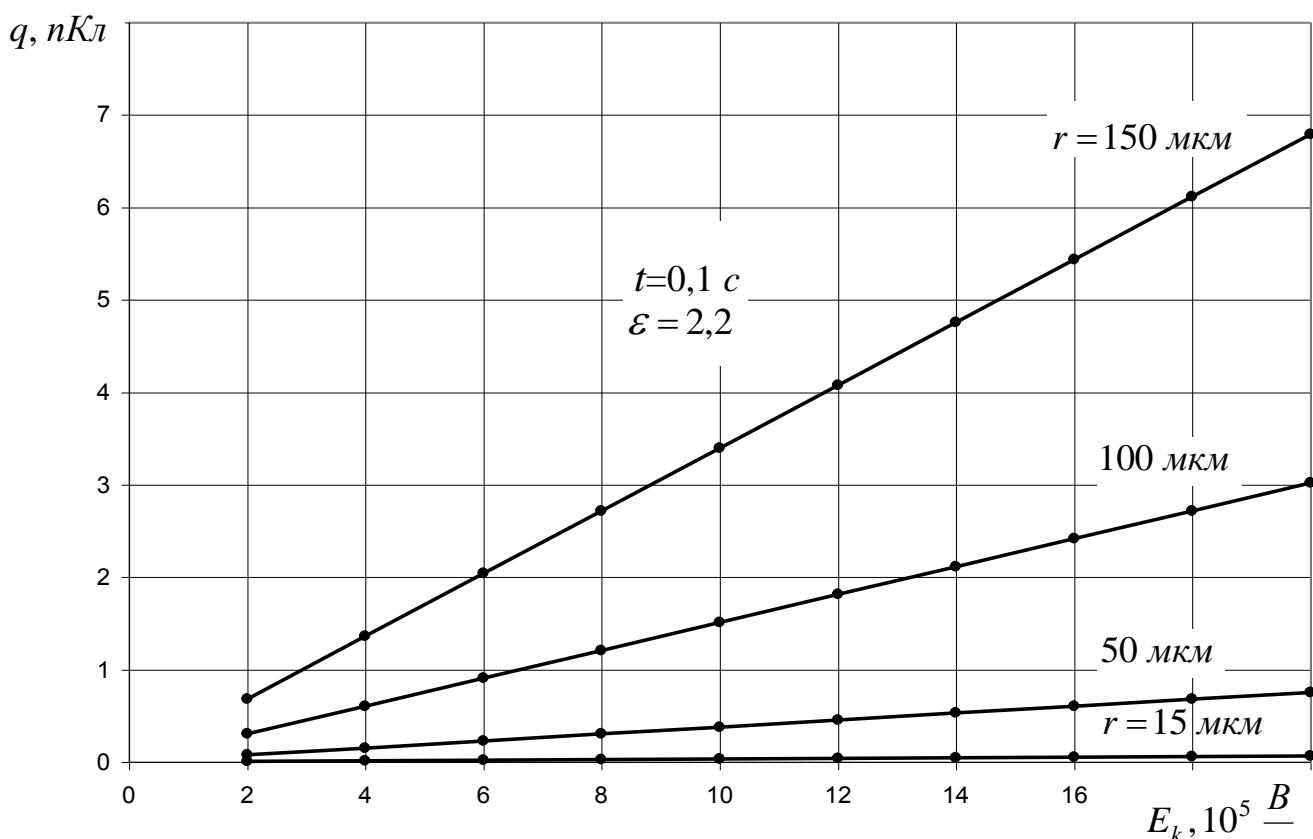


Рисунок 2.20 – Влияние напряженности поля положительного коронного разряда на заряд капель углеводородного топлива при $t = 0,1 \text{ с}$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon = 2,2$

Таблица 2.17 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.20

$E_k,$ 10^5 В/м	$q, \text{ нКл}$			
	$r = 15 \text{ мкм}$	$r = 50 \text{ мкм}$	$r = 100 \text{ мкм}$	$r = 150 \text{ мкм}$
2	0,006791	0,075456	0,301825	0,679107
4	0,013582	0,150913	0,603651	1,358214
6	0,020373	0,226369	0,905476	2,037322
8	0,027164	0,301825	1,207302	2,716429
10	0,033955	0,377282	1,509127	3,395536
12	0,040746	0,452738	1,810953	4,074643
14	0,047538	0,528195	2,112778	4,753751
16	0,054329	0,603651	2,414603	5,432858
18	0,06112	0,679107	2,716429	6,111965
20	0,067911	0,754564	3,018254	6,791072

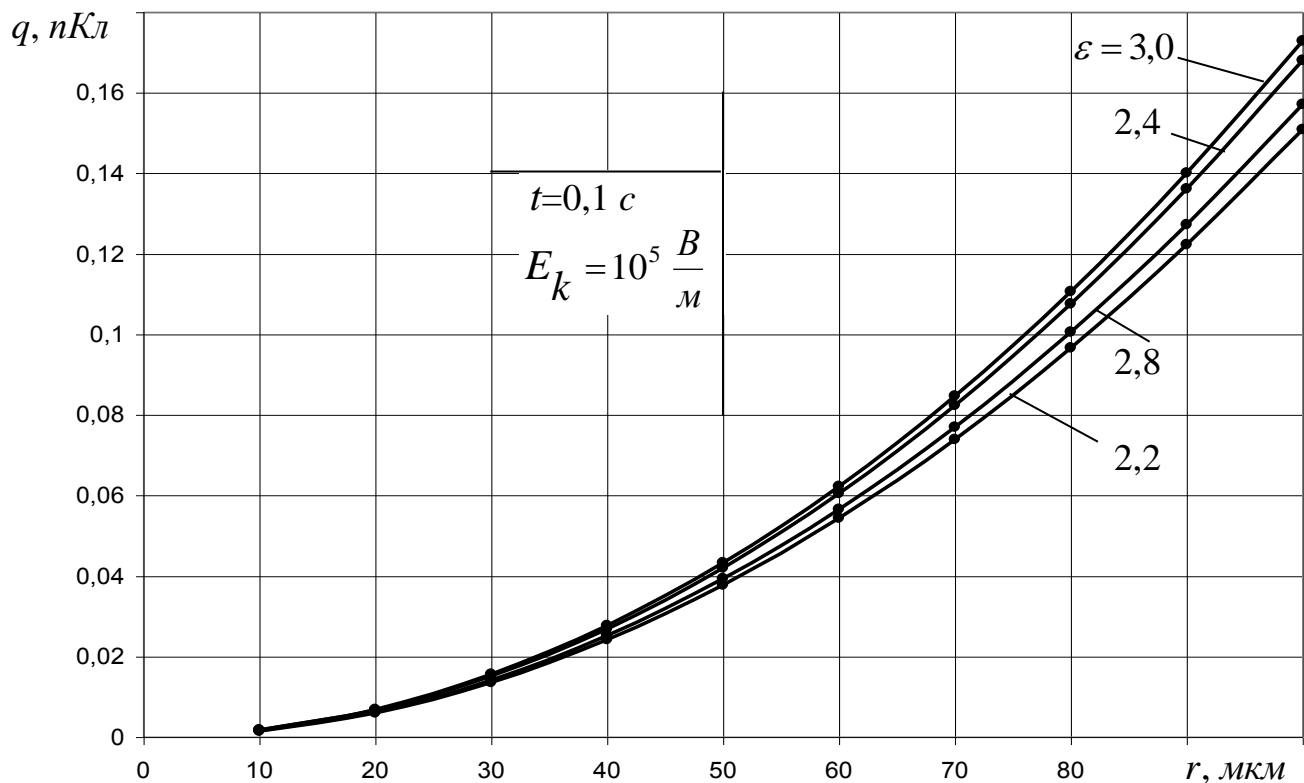


Рисунок 2.21 – Влияние радиуса капли и диэлектрической проницаемости углеводородного топлива на положительный заряд капель в поле положительного коронного разряда при $t = 0,1 \text{ c}$

Таблица 2.18 – Численные данные, соответствующие рисунку 2.21

$R, \text{ мкм}$	$q, \text{ нКл}$			
	$\varepsilon = 2,2$	$\varepsilon = 2,4$	$\varepsilon = 2,8$	$\varepsilon = 3,0$
10	0,001509	0,001571	0,001681	0,001729
20	0,006037	0,006286	0,006722	0,006915
30	0,013582	0,014143	0,015126	0,015558
40	0,024146	0,025144	0,02689	0,027658
50	0,037728	0,039287	0,042015	0,043216
60	0,054329	0,056574	0,060502	0,062231
70	0,073947	0,077003	0,08235	0,084703
80	0,096584	0,100575	0,10756	0,110633
90	0,122239	0,127291	0,13613	0,14002
100	0,150913	0,157149	0,168062	0,172864

На основании проведенных исследований (см. рисунки 2.13 – 2.24) по сообщению электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле коронного разряда, а также с учетом [91, 88, 90, 164] можно сделать следующие выводы:

– вне зависимости от полярности создаваемого во внешней области коронного разряда униполярного потока ионов (полярности острой кромки распыливающего сопла), капли различных диаметров топлива приобретают электрический заряд, равный 90 % от своего предельного значения за время 0,1–0,12 с нахождения в поле коронного разряда. С учетом скорости движения капель топлива это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании форсуночных модулей;

– имеется возможность легко регулировать знак и величину сообщаемого каплям электрического заряда изменением полярности коронирующего острого электрода и значения напряжения на электродах (изменением напряженности электрического поля), причем, чем больше диаметр капли, тем больше сообщаемый ей электрический заряд;

– при отрицательном потенциале электрического напряжения на острой кромке распыливающего сопла для выбранного типа топлива капля одного и того же диаметра при одной и той же напряженности электрического поля (определенном напряжении на электродах) приобретает электрический заряд больший по величине, чем при положительном потенциале. Одновременно при этом расширяется (при выбранных расстояниях между коронирующими электродами) диапазон изменения напряжения на электродах до искрового пробоя межэлектродного промежутка;

– чем больше относительная диэлектрическая проницаемость углеводородного диэлектрического топлива, тем больший по величине сообщаемый капле электрический заряд при одних и тех же напряжении и полярности на электродах и выбранном межэлектродном промежутке;

– с уменьшением радиуса закругления r_0 острой кромки распыливающего сопла униполярный поток ионов возникает при меньшем напряжении на электродах. Чем меньше r_0 , тем больший по величине электрический заряд можно

сообщить капле топлива при одном и том же напряжении на коронирующих электродах.

- чем меньше r_0 , тем больший по величине электрический заряд можно сообщить капле углеводородного топлива при одном и том же напряжении на коронирующих электродах;

- с уменьшением расстояния между коронирующими электродами уменьшается рабочий диапазон изменения напряжения на электродах при сообщении электрического заряда каплям углеводородных топлив в электрическом поле коронного разряда;

- с увеличением скорости обтекания коронирующего электрода при работе двигателей рабочим газом повышается пробивное напряжение межэлектродного промежутка и при этом увеличивается рабочий диапазон изменения напряжения на электродах, а, следовательно, можно сообщить больший по величине электрический заряд каплям углеводородных топлив.

Таким образом, для улучшения распыла топлива в форсуночных модулях с использованием коронного разряда целесообразно выбирать минимально возможный (с учетом технологии его получения) радиус закругления r_0 острой кромки распыливающего сопла, стремясь обеспечить при этом время нахождения капли распыливаемого топлива в поле коронного разряда не менее 0,1–0,12 с.

2.4 Оценка максимальной для выбранного межэлектродного промежутка объемной плотности электрического униполярного заряда, модели его образования в потоке углеводородного топлива в резко неоднородном электрическом поле

Одним из методов повышения эффективности процессов распыла топлива (керосина) и сгорания керосиновоздушной смеси является включение ЭУВТ в гидравлическую цепь питания непосредственно перед входом топлива в форсунку (см. 3 главу). При этом сообщают потоку топлива униполярный электрический заряд (униполярный поток ионов), создавая в ЭУВТ резко неоднородное электрическое поле между электродами типа «изла – плоскость».

На основании проведенных исследований электрогидродинамического метода сообщения униполярного электрического заряда потокам углеводородных

топлив в резко неоднородном электрическом поле (результаты которых изложены в подразделе 1.2.1 настоящей диссертации), можно заключить, что соответствующей организацией электродной системы ЭУВТ досижима объемная плотность электрического униполярного заряда в потоке диэлектрического углеводородного топлива порядка $10^{-1} \hat{E} / i^3$.

В настоящее время до конца не разработана теория проводимости диэлектрических жидкостей, к которым относится углеводородное топливо (керосин) в резко неоднородных электрических полях между электродами типа «игла - плоскость». Однако многочисленными экспериментальными исследованиями [88-91] подтвержден факт образования униполярного заряда в диэлектрической жидкости знака потенциала острого электрода.

В литературе по электрогидродинамике обычно рассматриваются две модели образования ионов в потоке жидкости: инжекционная и объёмно-диссоциационная [88, 261, 262]. В первой модели причиной появления объемного заряда в жидкости считается инжекция заряда с поверхности игольчатого электрода, во второй — объёмная диссоциация вблизи игольчатого электрода, причём диссоциация может быть нескольких типов: термическая и высоковольтная (эффект Вина), возникающая в областях повышенной напряженности электрического поля. В случае слабопроводящей жидкости термической диссоциацией можно пренебречь по сравнению с инжекционным механизмом ионообразования. Что касается эффекта Вина, возникающем в случае высоких напряжений, то в настоящее время этот механизм является малоизученным [263], и считается, что в целом вклад объёмной диссоциации обычно ниже, чем за счёт инжекции с поверхности игольчатого электрода.

Поэтому в настоящей работе рассматривается только инжекционная модель.

Считается, что вблизи игольчатого электрода образуются ионы только одного знака, причём их концентрация настолько мала, что влиянием ионов на физические свойства рабочей жидкости можно пренебречь. Таким образом, предполагается, что все физические и электрические свойства среды постоянны.

В качестве модели образования ионов у поверхности игольчатого электрода используется модель, в которой плотность тока ионов j_{inj} задаётся на поверхности

электрода следующей феноменологической функцией зависимости инъекции ионов от локальной напряженности поля, имеющей схожий вид с уравнением Фаулера-Нордгейма (см. [263, 11]):

$$j_{inj} = A_0 \exp\left(-\frac{B_0}{E}\right). \quad (2.32)$$

Однако, как показывают оценки [263], в интересующем диапазоне значений напряжённости электрического поля в ЭУВТ функция (2.32) практически линейна и может быть заменена следующим выражением:

$$j_{inj} = \max(AE - B, 0), \quad (2.33)$$

где \max — функция выбора максимального из двух значений.

В формулах (2.32) и (2.33) A_0 , B_0 , A и B являются константами, которые необходимо определять из эксперимента для рассматриваемой рабочей жидкости. Например, в [263] данные коэффициенты приведены для трансформаторного масла.

2.4.1 Уточнение инъекционной модели образования униполярного потока ионов в углеводородном топливе в резко неоднородном поле

Объектом численного электрогидродинамического исследования в работе автора [11] являются процессы возникновения униполярного потока ионов в топливе, в качестве которого используется авиационный керосин ТС-1, в резко неоднородном электрическом поле.

Полная система уравнений электрогидродинамики имеет вид [11]:

$$\gamma \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \gamma(\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} - \rho \nabla \Phi ; \quad (2.34)$$

$$\nabla \vec{v} = 0 ; \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial c_+}{\partial t} + \operatorname{div}(-D\nabla c_+ - z_+ b F c_+ \nabla \phi) = R - \vec{v} \nabla c_+ ; \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial c_-}{\partial t} + \operatorname{div}(-D\nabla c_- - z_- b F c_- \nabla \phi) = R - \vec{v} \nabla c_- ; \quad (2.37)$$

$$\rho = F(z_+ c_+ + z_- c_-). \quad (2.38)$$

Здесь ρ - объемная плотность электрического заряда, γ - плотность рабочей жидкости, v - скорость течения рабочей жидкости, p - давление, η - динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости, φ - потенциал электрического поля, ε - относительная диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, D - коэффициент диффузии, F - число Фарадея, b - подвижность ионов, R - коэффициент рекомбинации ионов, c_+, c_- - концентрации положительных и отрицательных ионов соответственно, z_-, z_+ - зарядовые числа.

С целью уточнения инжекционной модели образования в рабочей жидкости объемного униполярного заряда проводится численное моделирование ЭГД воздействия на топливо электрического заряда, инжектируемого в топливо в резко неоднородном поле у острия тонкой иглы, расположенной в цилиндрическом канале, между потенциальным игольчатым электродом и нейтральным электродом в виде плоскости с центральным отверстием. Данный объект моделирования представляет собой, в частности, статический электрогидродинамический преобразователь (ЭГП), для которого имеются экспериментальные данные [88 -91].

Исходная геометрическая модель приведена на рисунке 2.22.

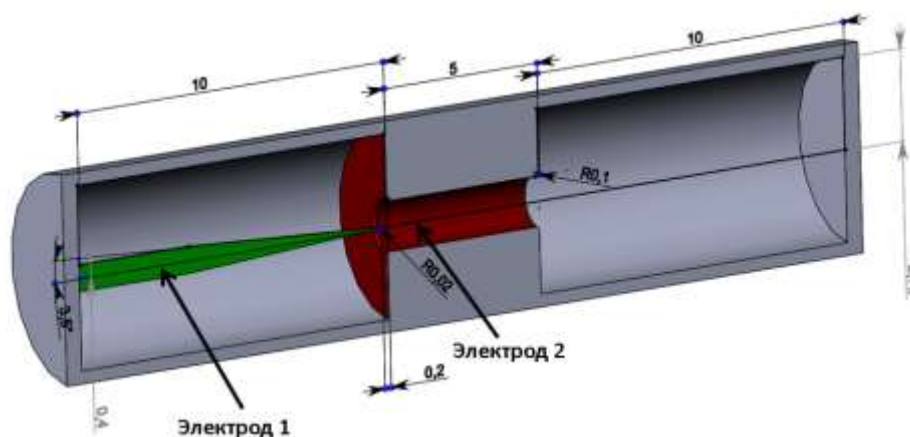


Рисунок 2.22 – К уточнению инжекционной модели образования униполярного электрического заряда в диэлектрической жидкости

Диаметр иглы d_u принимался равным 0.8 мм, диаметр отверстия в центральном электроде $d = 1.5$ мм. Канал полагается запертым с двух концов. На электрод 1 подается положительный потенциал U . Электрод 2 заземлен. В результате образования резко неоднородного электрического поля вблизи кончика иглы с большой электрической напряженностью у поверхности иглы возникают в жидкости положительно заряженные ионы (знака потенциала игольчатого электрода). Поток данных ионов под действием электрических сил движутся к противоположному электроду, приводя в движение окружающую диэлектрическую жидкость и создавая избыточное давление.

Для моделирования данного электрогидродинамического процесса была разработана расчетная численная модель [11]. Для описания поведения диэлектрической жидкости использовались основные уравнения электрогидродинамики для описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в изотермической несжимаемой жидкости вида (2.34) – (2.39). В качестве инжекционной модели образования униполярных ионов у острия игольчатого электрода используется модель, определяемая выражениями (2.32) и (2.33).

Поскольку для рассматриваемой жидкости (керосин ТС-1) таких экспериментальных данных нет для данных конфигураций электродов ,

параметры выбраны примерно соответствующие параметрам, где в качестве изучаемой диэлектрической жидкости рассматривалось трансформаторное масло.

Что касается граничного условия для зарядов на противоположном электроде типа «плоскость с отверстием», то считается, что все ионы, попадающие на плоский электрод, нейтрализуются, т.е. объемная плотность заряда равна нулю.

Свойства жидкости в расчетах соответствуют свойствам керосина типа ТС-1: плотность 780 кг/м^3 , динамический коэффициент вязкости $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.2$. Подвижность ионов в жидкости бралась равной $b_i = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, ионный коэффициент диффузии $D = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Коэффициенты инжекции по формуле (8) принимались равными $A = 1.92 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}/(\text{В}\cdot\text{м}\cdot\text{с})$, $B = 2.04 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. Данные коэффициенты получены в результате проведения многовариантных численных расчетов, позволившим определить характеристики, удовлетворяющие экспериментальным данным.

По всем границам, отвечающим непроницаемым стенкам ставится условие равенства нулю всех компонент вектора скорости рабочей жидкости.

Расчет проводился в пакете численного моделирования ANSYS/CFX на основе метода контрольных объемов. Расчеты проводились в осесимметричной постановке. Разработанная расчетная сетка для осесимметричного сечения приведена на рисунке 2.23.



Рисунок 2.23 – Расчетная сетка для уточнения инжекционной модели образования униполярного электрического заряда в углеводородно топливе

Результат полученных характеристик расчетных величин представлены в виде картин распределений объемного электрического заряда и давления в продольном сечении канала. Для наглядности распределения приведены с учетом отражения от горизонтальной плоскости.

Так, распределение объемного заряда в канале для нескольких значений напряжений представлено на рисунке 2.24.

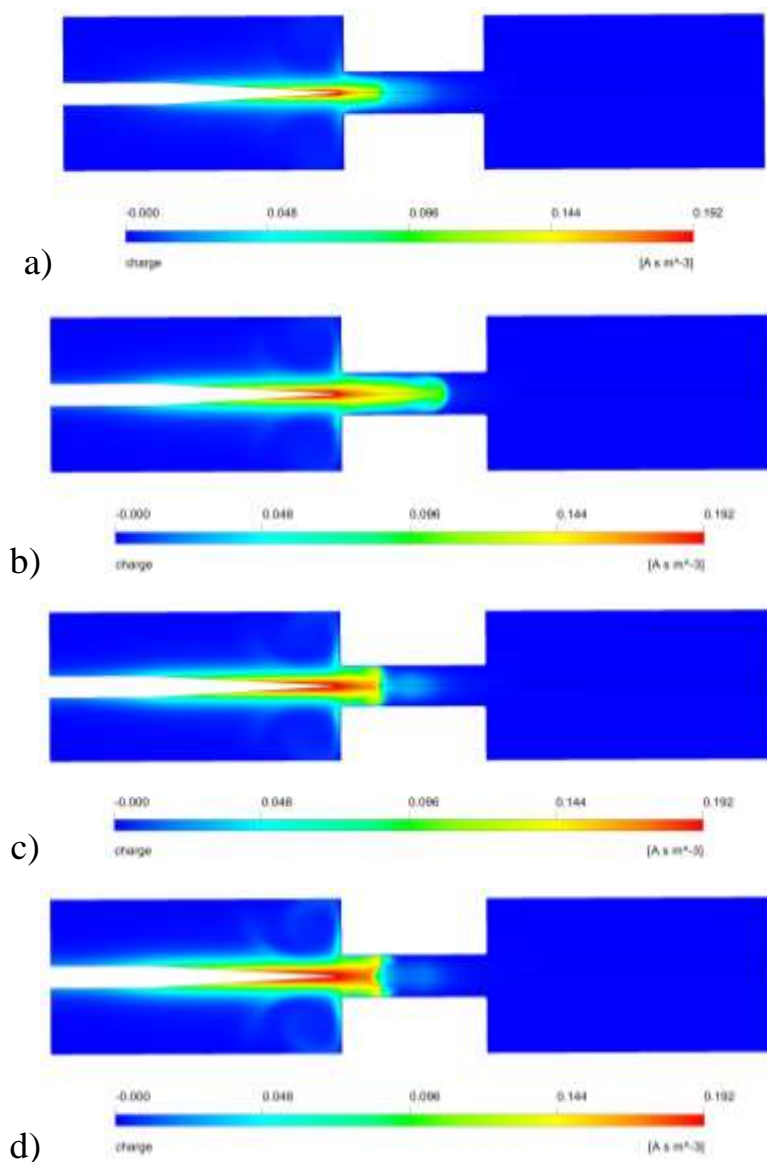


Рисунок 2.24 – Распределение объемного заряда в камере для различных подаваемых напряжений:

a) $U=10$ кВ, a) $U=15$ кВ, a) $U=20$ кВ, a) $U=25$ кВ,

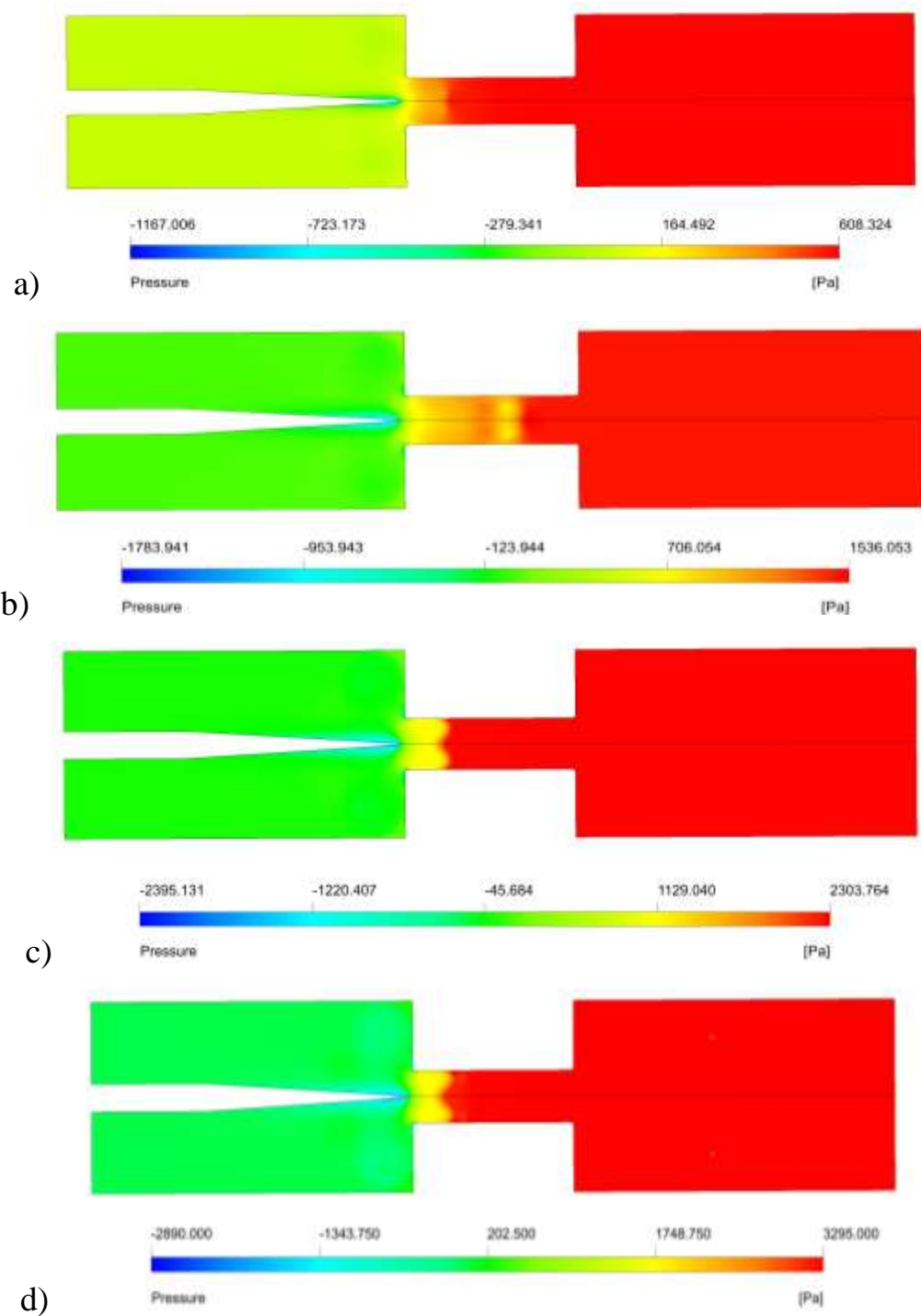


Рисунок 2.25 – Распределение давления в канале для различных подаваемых напряжений на электроды типа «игла – плоскость с отверстием»:

a) $U=10$ кВ, b) $U=15$ кВ, c) $U=20$ кВ, d) $U=25$ кВ.

При моделировании исследовалась зависимость создаваемого избыточного давления в рабочей жидкости в правой части камеры от величины подаваемого напряжения на электроде 1. Рассматривалось несколько значений $U = 10$ кВ, 15 кВ, 20 кВ и 25 кВ.

Распределение статического давления в канале (за счет передачи количества движения униполярных ионов рабочей жидкости) для нескольких значений электрического напряжения на электродах представлены на рисунке 2.25.

Из представленных рисунков следует, что с увеличением подаваемого напряжения вызванное движением униполярных ионов давление в камере увеличивается.

Экспериментально снятая зависимость создаваемого потоком униполярных ионов на выходе камеры давления от приложенного к электродам напряжения приведена на рисунке 2.26 (сплошная линия) [88,89].

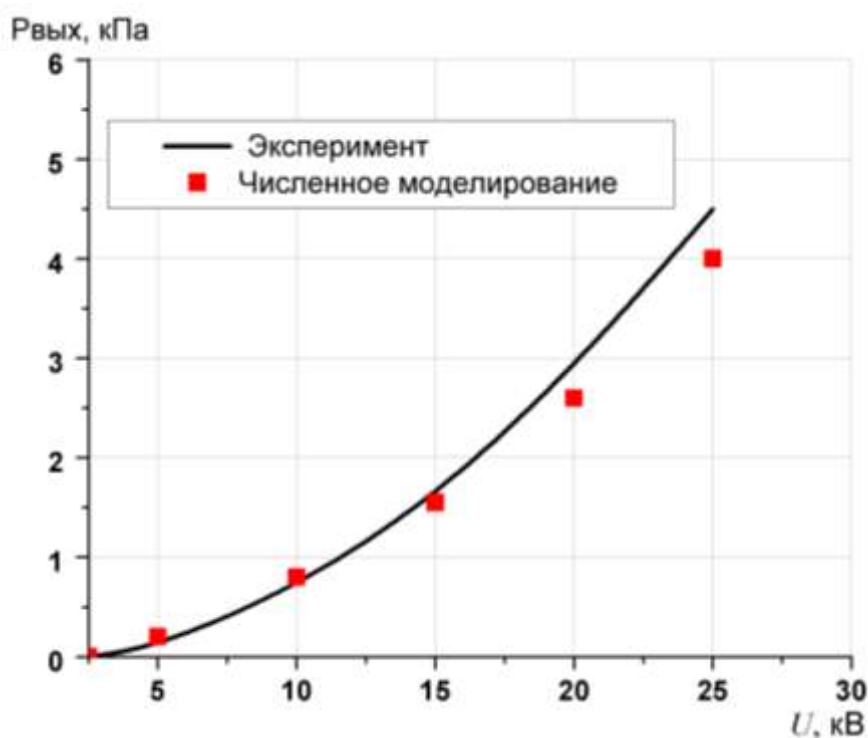


Рисунок 2.26 – Сравнительный анализ результатов эксперимента и численного расчета по уточненной инжекционной модели для создаваемого потоком униполярных ионов давления на выходе камеры

Как видно из рисунка 2.26 экспериментальная кривая и численный расчет по уточненной инжекционной модели имеют хорошее согласование.

Таким образом, можно говорить, что разработанная электрогидродинамическая модель, в том числе уточненная инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в топливе у игольчатого электрода в резко неоднородном поле, дает положительные результаты и может быть принята для дальнейших исследований электрических устройств воздействия на топливо.

2.4.2 Инжекционная модель образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле в форсуночном модуле (электропневматической форсунке)

2.4.2.1 Методология уточнения инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле форсуночных модулей применительно к электропневматическим форсункам авиационных двигателей

Как отмечалось выше, при разработке принципиально новых форсуночных модулей ориентируемся на использование суперкомпьютерных вычислений при численном моделировании электрогидродинамических процессов распыла керосина и горения керосиновоздушных смесей с дальнейшей верификацией экспериментом результатов численных расчетов.

Инжекционная модель образования униполярного заряда в потоке керосина в резко неоднородном поле между электродами типа «игла – плоскость» необходима при численном моделировании исследуемых процессов для задания граничных условий на игольчатом электроде (в непосредственной близости от него). В непосредственной близости от острия напряженность электрического поля будет больше некоторой критической величины (по подобию с начальной

напряженностью поля при коронном разряде). Вдали от острия напряженность поля уменьшается.

Это обстоятельство необходимо учитывать при задании граничных условий у острого электрода, в том числе выбрать существенное сгущение расчетной сетки с большим количеством элементов в непосредственной близости от острия.

Кроме того, с учетом, что радиус закругления острого электрода ЭУВТ может быть очень малым (1-5 мкм), размер расчетной ячейки должен быть существенно меньше радиуса закругления игольчатого электрода.

Значение коэффициентов инжекционной модели образования униполярного заряда (униполярного потока ионов в топливе) вблизи острой поверхности электрода типа игла, входящих в выражение (2.33), зависит от типа рабочей диэлектрической жидкости (топлива) и от конструктивных параметров ЭУВТ. Чем точнее мы будем учитывать эти обстоятельства, тем более достоверны будут результаты численных расчетов, которые будут в дальнейшем использованы при разработке конструкций реальных форсуночных модулей. В свою очередь, ЭУВТ, входящий в состав форсуночного модуля, может быть включен как в цепь питания на входе форсунки, так и может быть конструктивно реализован в самой форсунке. В последнем случае такой форсуночный модуль будем называть электропневматической форсункой (ЭПФ). Это название отражает его функциональное назначение с учетом того, что для исследований и разработок, в частности, выбрана базовая пневматическая форсунка газотурбинного двигателя.

Поэтому при нахождении коэффициентов A и B в уравнении инжекции (2.33) с использованием численных расчетов для разработанной конструкции ЭПФ применительно к газотурбинному авиационному двигателю необходимо выполнить следующие методологические рекомендации:

1. Необходимо точно провести численное моделирование геометрии межэлектродного промежутка с реальными конструктивными параметрами электропневматической форсунки (форсуночного модуля) с заданием материала электродов и физико-химических параметров рабочей

- жидкости (керосина) с учетом возможного диапазона изменения температуры при работе авиационного двигателя на различных режимах;
2. Экспериментально снять вольт-амперную характеристику реальной конструкции ЭПФ для ее данных геометрии и конструктивных параметров в заданном диапазоне изменений температуры окружающей среды;
 3. Для заданных (выбранных) значений коэффициентов A и B в уравнении инъекции (2.33) произвести численное решение системы электрогидродинамических уравнений при соответствующих граничных условиях;
 4. Найти по результатам проведенных численных исследований вольт-амперную характеристику электропневматической форсунки (расчетную вольт-амперную характеристику). Расчетную вольт-амперную характеристику ЭПП строить следующим образом: когда численное решение уравнений электрогидродинамики для заданных геометрии и конструктивных параметров межэлектродного промежутка ЭПФ при соответствующих граничных условиях выйдет на установившееся решение, необходимо взять интеграл по всей поверхности игольчатого электрода ЭПФ и найти полный электрический ток при данном электрическом напряжении на электродах ЭПФ;
 5. Сравнить расчетную (на этом шаге) вольт-амперную характеристику с экспериментально снятой вольт-амперной характеристикой электропневматической форсунки;
 6. В случае отличия этих вольт-амперных характеристик скорректировать значения коэффициентов A и B в уравнении инъекции (2.33) и произвести численное решение системы электрогидродинамических уравнений при скорректированных граничных условиях;
 7. Выполнять п.п. 5 и 6 до тех пор, пока, пока сравнительные результаты расчета и эксперимента для вольт-амперных характеристик ЭПП не обеспечат допустимую (требуемую) точность;

8. На основании результатов по п.7 найти окончательные значения коэффициентов A и B в уравнении инжекции (2.33).

Разработанная методология корректировки инжекционной модели создания потока униполярных ионов в углеводородном топливе в резко неоднородном поле для электропневматической форсунки может быть применена и для конкретного ЭУВТ, включенного в цепь питания отдельно взятой пневматической форсунки. В этом случае численные модели электродной системы должны быть разработаны для данного ЭУВТ. Кроме того, также должны быть получены экспериментально снятые вольт-амперные характеристики данного ЭУВТ с выбранным типом углеводородного топлива.

2.4.2.2 Экспериментальное определение вольт-амперной характеристики электропневматической форсунки

Для уточнения коэффициентов инжекционной модели образования униполярного заряда вблизи острой поверхности электрода типа игла, входящих в выражение (2.33), была выполнена работа по определению вольт-амперной характеристики (ВАХ) разработанной электропневматической форсунки (ЭПФ), схема которой представлена на рисунке 2.27. Данная электропневматическая форсунка была разработана для испытаний в составе отсека по определению характеристик распыла и горения топлива.

К электроду №1, включающему в себя внутренний металлический воздушный завихритель и электрически контактирующую с ним металлическую втулку, образующую внутренний воздушный канал форсунки, подводится электрическое напряжение через выносную клемму. Максимальный радиус закругления острой кромки электрода №1 составляет 5 мкм, что обеспечивает высокую напряженность электрического поля вблизи неё.

Электрод №2 образован металлическим распыливающим соплом и соединён с корпусом ЭПФ.

Друг от друга электроды отделены посредством керамических проставок и каналов, по которым течёт керосин.

При подаче электрического напряжения на электроды происходит образование униполярного электрического заряда в топливе вблизи острой кромки электрода №1 и его частичный вынос вместе с потоком топлива. В случае погружения форсунки в керосин, ионы, инжектируемые с поверхности острой кромки электрода №1, будут достигать распыливающего сопла (электрода №2), в результате чего в цепи появится электрический ток, который может быть измерен. Исходя из этого, можно определить зависимость силы тока, протекающего в цепи, от напряжения, подаваемого на электроды, то есть получить вольт-амперную характеристику ЭОФМ. Поскольку вольт-амперная характеристика определяется инъекцией ионов с поверхности электрода, она может быть использована для уточнения коэффициентов A и B инжекционной модели, используемой в электрогидродинамических расчётах.

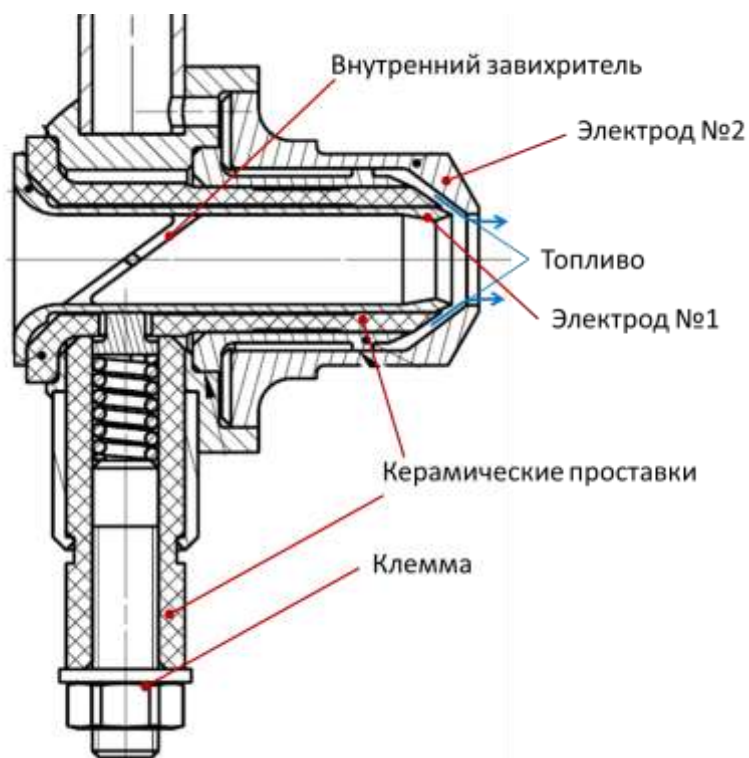


Рисунок 2.27 – Устройство разработанной электропневматической форсунки газотурбинного двигателя

Для выполнения измерений была собрана установка, состоящая: из источника питания постоянного напряжения 27 В; высоковольтного усилителя, управляемого унифицированным сигналом связи 0 – 5 В, позволяющего регулировать выходное напряжение от 0 до 10 кВ при изменении входного напряжения от 9 до 5 В; киловольтметра; микроамперметра; наноамперметра; ключа; емкости с керосином и ЭПФ, представленная на рисунке 2.28.

Схема подключения приборов представлена на рисунке 2.29.



Рисунок 2.28 – Установка для определения ВАХ электропневматической форсунки

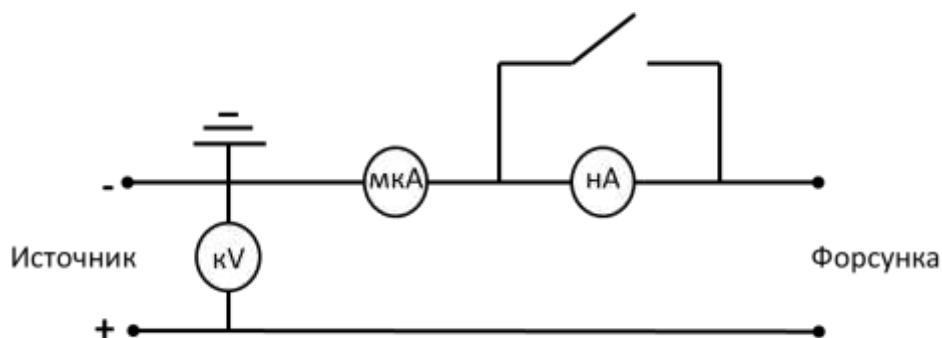


Рисунок 2.29 – Схема подключения приборов

Киловольтметр использовался для измерения высокого напряжения с выхода высоковольтного усилителя, подаваемого на электроды ЭПФ. Микроамперметр М-24 предназначен для определения наличия пробоя между электродами ЭПФ. Электронный наноамперметр с ценой деления 10 нА предназначен для определения силы тока в электрической цепи ЭПФ. Для того, чтобы предохранить наноамперметр от высокого тока при пробое, была предусмотрена возможность его шунтирования механическим ключом, который размыкался при отсутствии пробоя и отсчитывается электрический ток. Положительный потенциал электрического напряжения подавался на электрод №1, отрицательный – на электрод №2.

Перед началом испытаний ЭПФ была полностью погружена в емкость с керосином. Из ЭПФ был вытеснен воздух, так что все внутренние полости ЭПФ были заполнены топливом. Испытания проводились по следующей схеме:

1. Включение источника;
2. Установка начального напряжения 1000 В;
3. При отсутствии пробоя по показаниям микроамперметра размыкался ключ,
4. Фиксация показаний наноамперметра;
5. Замыкание ключа;
6. Увеличение напряжения на 500 В;
7. Повторение пунктов 3...6 до фиксации пробоя;
8. Отключение установки.

Результаты эксперимента

В результате проведенных экспериментальных исследований экспериментального образца ЭПФ установлено, что при напряжении 4,5 кВ начались пробои между электродами электропневматической форсунки, испытание было остановлено. При напряжении 2, 3 и 4 кВ показания наноамперметра были непостоянными, что вызвано недостаточной ценой деления прибора. Тем не менее, по результатам испытаний явно прослеживается квазилинейная в этом диапазоне ихменений входных напряжений зависимость

силы тока от входного электрического напряжения, а также тот факт, что существует некоторое начальное ненулевое напряжение, начиная с которого в цепи появляется электрический ток. На рисунке 2.30 представлена полученная вольт-амперная характеристика ЭПФ. Для точек с непостоянными показаниями наноамперметра было принято среднее значение.

Полученные результаты позволили определить зависимость силы тока в нА от напряжения в кВ, которая может быть использована для уточнения коэффициентов инжекционной модели.

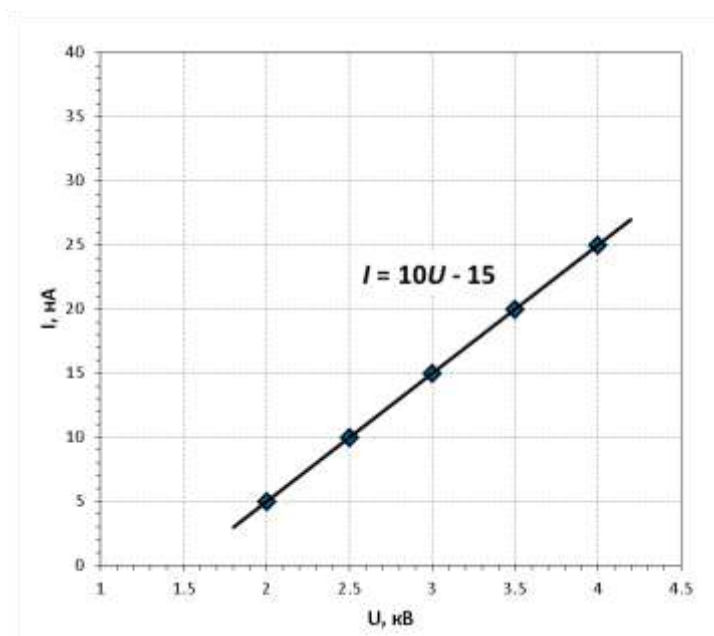


Рисунок 2.30– Вольт-амперная характеристика электропневматической форсунки

2.4.2.3 Уточнение инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле электропневматической форсунки

Расчётная модель.

Для выполнения численного расчёта процесса возникновения электрического тока между электродами ЭПФ при подаче на его электроды электрического

напряжения была построена область (рисунок 2.31), включающая в себя внутренние топливные каналы разработанной форсунки, центральный воздушный канал, а также область вокруг ЭПФ в виде сферы диаметром 30 мм.

Для сокращения затрат на выполнение расчётов использовался сектор 120° , поскольку внутри форсунки имеется 3 канала для закрутки топлива.

Расчётная сетка

Построение расчётной сетки было выполнено в программном комплексе ICEM CFD. Была сгенерирована неструктурированная тетраэдральная сетка с семью слоями призматических элементов вблизи поверхностей форсунки. Достоинством тетраэдральных элементов является возможность описания сложной геометрии и анизотропная структура полученной сетки. Призматические элементы позволяют

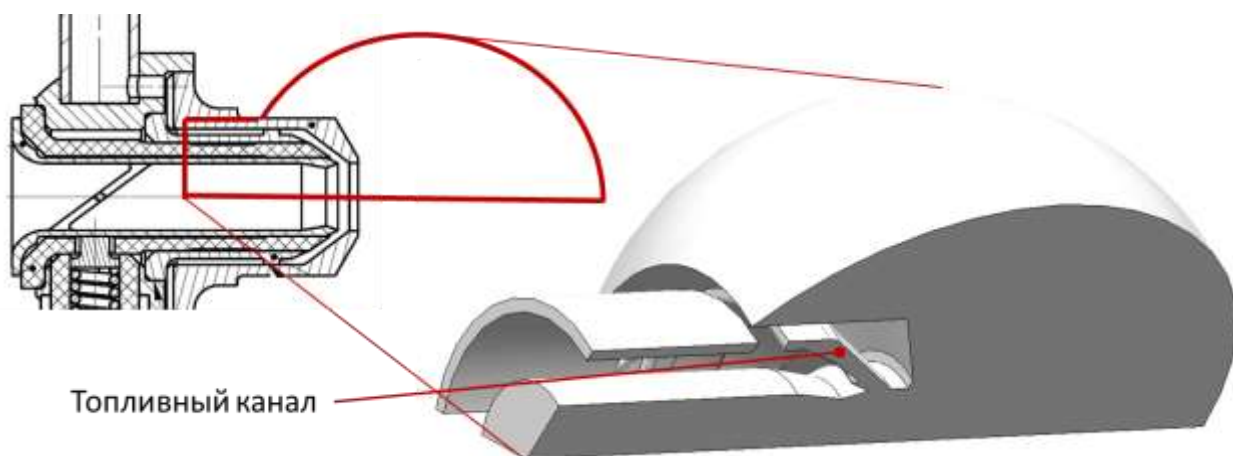


Рисунок 2.31 – Расчётная область для определения вольт-амперных характеристик электропневматической форсунки с целью уточнения инжекционной модели создания в керосине униполярного потока ионов

подробно описать процессы, происходящие в пограничном слое. Для детального описания процессов вблизи электрода №1, с которого происходила инжекция униполярных ионов, вблизи него было организовано сгущение сетки.

Продольный разрез полученной сетки и характерные размеры элементов в различных областях представлены на рисунке 2.32.

Параметры сетки приведены в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Параметры расчетной сетки

Параметр	Количество тетраэдров, шт.	Количество призм, шт.	Количество узлов, шт	Минимальное качество элемента
Значение	2 163 184	609 126	722 501	0,035

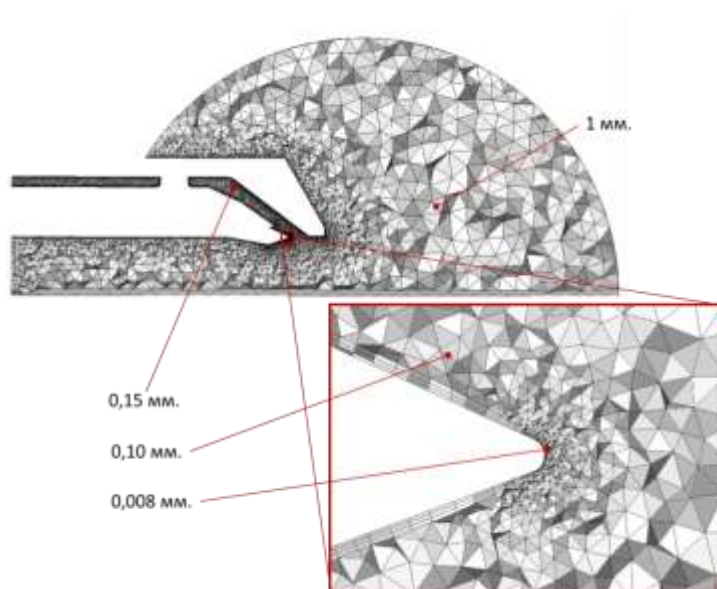


Рисунок 2.32 – Расчётная сетка сектора электропневматической форсунки

Методология расчёта.

При выполнении расчётов для построения вольт-амперной характеристики использовалось напряжение 2500 В и 3500 В, так как для данных значений при проведении эксперимента было зафиксировано устойчивое значение силы тока, а также 3000 В в качестве дополнительной точки для более точного определения угла наклона ВАХ. Первоначальные значения коэффициентов А и В в формуле (2.33) принимались согласно работе [11] (см. выше п. 2.4.2.2) $A=1,92 \cdot 10^{-9}$ Кл/(В·м·с), $B=2,04 \cdot 10^{-4}$ Кл/(м²·с), затем их значения корректировались в

зависимости от результатов расчётов на базе системы уравнений электрогидродинамики (2.34) – (2.38).

Свойства рабочей жидкости соответствовали жидкому керосину: плотность 780 кг/м^3 , коэффициент динамической рабочей вязкости $\mu=0.0024 \text{ Па}\cdot\text{с}$, диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2,2$. Подвижность ионов в рабочей жидкости бралась равной $b_i=10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, ионный коэффициент диффузии $D_i=2,5\cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Области задания граничных условий представлены на рисунке 2.33, для наглядности одна из сторон периодичности не показана. На электроде №1 (активный) задавался постоянный потенциал $2500\dots 3500 \text{ В}$ и поток заряда согласно выражению (2.33). На электроде №2 задавался нулевой потенциал и нейтрализация всего заряда, достигающего поверхности электрода. На керамической поверхности изолирующей шайбы задавался нулевой поток заряда и электрического поля. На открытых границах нулевой поток электрического поля и нулевое значение заряда для затекающего потока. На периодичности определялся консервативный поток заряда и электрического поля. Для керосина на поверхности электродов и керамической проставки задавалось условие прилипания потока.

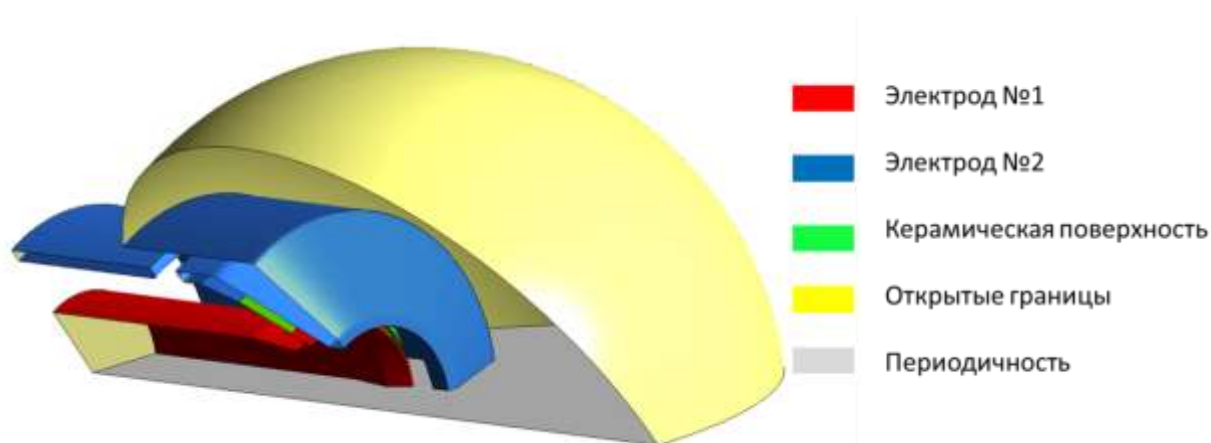


Рисунок 2.33 – Области задания граничных условий при электрогидродинамических расчетах электропневматической форсунки

В начальный момент времени во всей расчётной области скорость керосина потенциал электрического поля, объёмная плотность заряда были равны нулю.

Расчёты выполнялись в стационарной постановке с шагом по времени 0,00005 с. В связи с тем, что резкое появление заряда вблизи острой кромки электрода в начале расчета приводило к нефизичному росту скорости в расчётной области, инъекция заряда принудительно уменьшалась за счёт введения весового коэффициента, изменяющегося от нуля на первой итерации до единицы на 1000-й, после этого он не изменялся. Было установлено, что 2500 итераций достаточно для получения устойчивого потока электрического заряда от электрода №1 к электроду №2. После этого потенциал на электроде №1 скачкообразно увеличивался на 500 В, а через 1000 итераций еще на 500 В. Общая длительность одного расчёта составляла 4500 итераций.

Чтобы определить вольт-амперную характеристику форсунки, для каждого значения электрического потенциала (2500, 3000, 3500 В) была определена сила тока, равная интегралу от потока инжестируемого заряда по поверхности электрода №1, умноженному на 3, так как в расчёте использовался сектор 120°. В данном случае предполагалось, что весь заряд, инжестируемый с электрода №1 достигает электрода №2.

Результаты расчёта

При выполнении расчёта с исходными значениями коэффициентов полученная вольт-амперная характеристика оказалась значительно выше полученной экспериментально (рисунок 2.34).

В результате серии расчётов были подобраны новые значения коэффициентов: $A=2,25 \cdot 10^{-10}$ Кл/(В·м·с), $B=0,6 \cdot 10^{-3}$ Кл/(м²·с), при которых расчётная вольт-амперная характеристика близка к экспериментальной.

Следует отметить, что найденные значения коэффициентов уточненной инъекционной модели для керосина имеют тот же порядок величин, что и полученные в [263] для трансформаторного масла. В [263] для

трансформаторного масла получены следующие значения коэффициентов: $A=6,409 \cdot 10^{-10}$ Кл/(В·м·с), $B=3,204 \cdot 10^{-3}$ Кл/(м²·с),

Данные значения коэффициентов будут использоваться при последующих расчётах сообщения заряда топливу в электрическом устройстве воздействия на топливо и ЭПФ. Совпадение вольт-амперной характеристики, полученной при расчёте с уточнёнными коэффициентами, с экспериментом подтверждает работоспособность используемой теоретической модели.

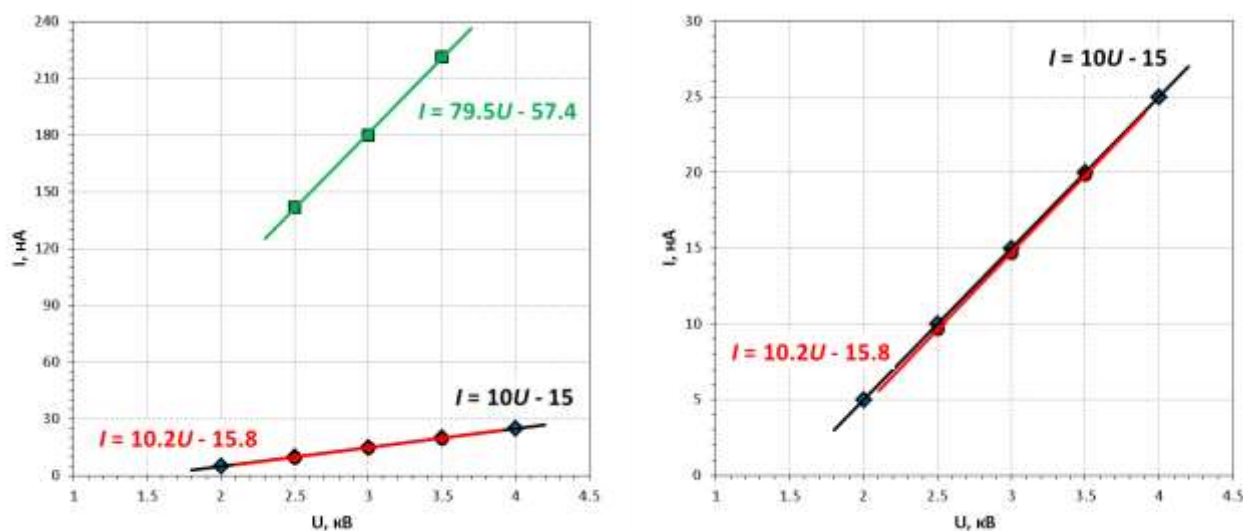


Рисунок 2.34 – Вольт-амперные характеристики ЭПП в эксперименте (черная), с исходными значениями коэффициентов (зеленая) и с уточнёнными коэффициентами (красная)

На рисунке 2.35 представлено распределение электрического потенциала в продольном сечении расчётной области и напряженности электрического поля вблизи острой кромки электрода №1 при расчёте с уточнёнными коэффициентами и разности потенциалов на электродах 2500 Вольт.

На рисунке 2.36 для этих же условий представлено распределение заряда с наложенными векторами скорости между электродами.

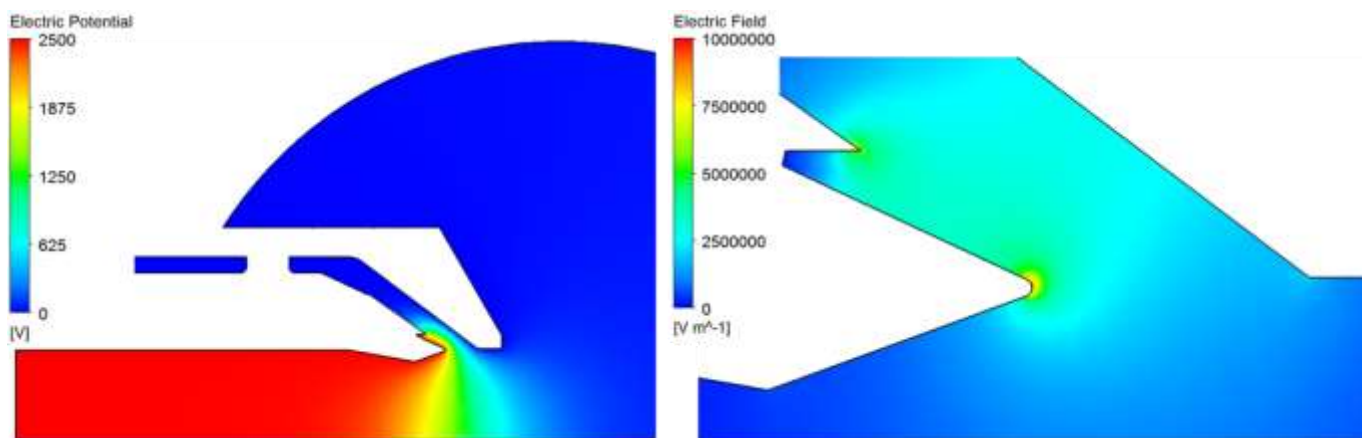


Рисунок 2.35 – Электрический потенциал (слева) и модуль напряженности электрического поля (справа) в электропневматической форсунке

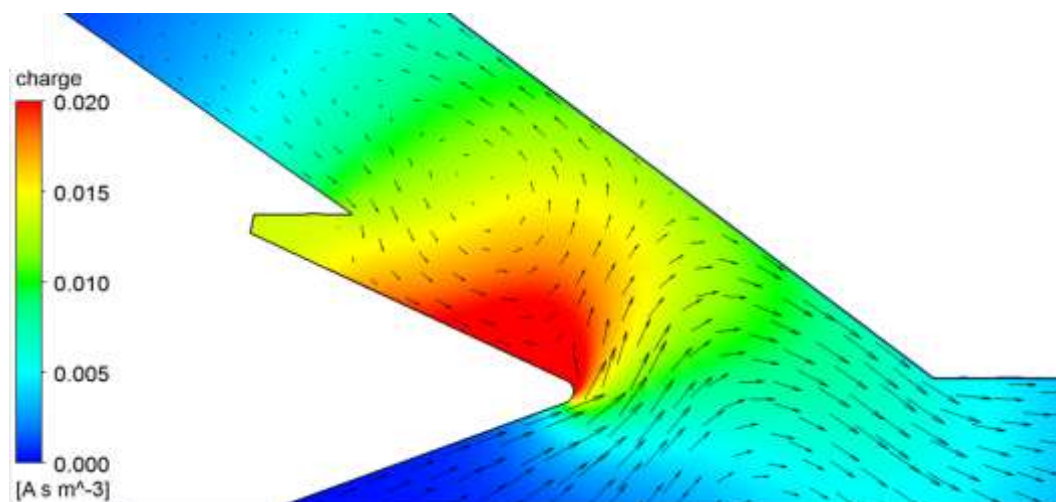


Рисунок 2.36 – Распределение объемной плотности заряда и вектора скорости в электропневматической форсунке

Из представленных изображений видно, что наибольшая напряженность электрического поля наблюдается вблизи острой кромки электрода №1, образованного внутренним воздушным завихрителем и втулкой с острой кромкой. С острой кромки втулки происходит инжекция униполярного электрического заряда в поток керосина. Ионы движутся к противоположному электроду, что приводит к циркуляции керосина внутри ЭПФ. При функционировании электропневматической форсунки (подается давление питания в цепь подачи

топлива) часть электрического заряда, достигающего противоположного электрода, нейтрализуется на нем, однако другая более значительная часть его часть уносится на выход форсуночного модуля вместе с потоком керосина, движущегося вдоль поверхности распыливающего сопла.

2.5 Электрофизические и экспериментальные основы повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях с использованием переменных электрических полей

Вопросы повышения эффективности распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях при приложении к потоку топлива переменного электрического поля подробно рассмотрены в первой главе настоящей диссертации. С учетом [25, 26, 65, 76,79, 229] здесь можно добавить следующее.

В настоящее время нет единой общепринятой теории, объясняющей повышение эффективности процессов сгорания топлива при воздействии на него переменным электрическим полем. Однако очевидно, что ее разработка должна базироваться на рассмотрении баланса внутренней энергии топлива при приложении к нему переменного электрического поля. Кроме того, необходимо учитывать при этом диэлектрические потери в топливе, которые могут привести к разогреву топлива и дополнительному уменьшению его вязкости.

В свою очередь, диэлектрические потери в топливе при приложении к нему переменного электрического поля можно охарактеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$. Здесь δ — угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи, образованной источником напряжения и электродами ЭУВТ с размещенным между ними углеводородным топливом. Величина $tg\delta$ является важной *измеряемой* характеристикой *диэлектриков вообще*, и углеводородных топлив, в частности. Чем больше $tg\delta$, тем более высокие (при прочих равных условиях) диэлектрические потери.

Выше отмечалось, что поскольку углеводородное топливо является многокомпонентной химической средой, содержащей примеси, то его можно рассматривать как слабый полярный диэлектрик. При переменном напряжении диэлектрические потери возникают под действием, как тока сквозной проводимости, так и релаксационных видов поляризации и процессов возбуждения полем вращательных и колебательных энергетических уровней молекул углеводородного топлива. Величина активной мощности P , рассеиваемой в углеводородном топливе при приложении к нему переменного электрического поля, равна $P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$, где U – электрическое напряжение на электродах, между которыми находится углеводородное топливо; C – электрическая емкость конденсатора, образованного электродами с находящимся между ними топливом; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота приложенного к электродам переменного напряжения с частотой f в герцах. Следовательно, величина рассеиваемой мощности (диэлектрические потери) зависит от квадрата приложенного напряжения, его частоты, емкости и $\operatorname{tg} \delta$ топлива. Емкость C , в свою очередь, зависит от конструктивного исполнения электродной системы ЭУВТ и диэлектрической проницаемости ε углеводородного топлива, а диэлектрическая проницаемость ε и $\operatorname{tg} \delta$ зависят от типа углеводородного топлива (его химического состава и структуры). В свою очередь $\operatorname{tg} \delta$ имеет четко выраженную сильную зависимость при заданной температуре от частоты приложенного к топливу переменного электрического поля (переменного напряжения на электродах ЭУВТ).

Причем диэлектрические потери, вызванные дипольно-релаксационными потерями и релаксационными потерями при возбуждении вращательных и колебательных энергетических уровней молекул в топливе в переменных электрических полях, характеризуются наличием максимума на частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$, определяемого временем релаксации τ . Максимальное значение $\operatorname{tg} \delta$ в топливе соответствует такому соотношению между периодом приложенного к топливу переменного напряжения и временем релаксации τ , при котором наблюдается наибольшая затрата энергии на преодоления диполями топлива сопротивления вязкого трения. В этом случае эффективность воздействия

электрического поля на топливо будет максимальной. При этом положение максимума $tg\delta$ на кривых зависимости $tg\delta$ от частоты будет соответствовать круговая частота переменного напряжения на электродах, обратная временем релаксации τ , то есть $\omega = 1/\tau$.

При возбуждении в переменном электрическом поле колебательных уровней С – С и С — Н связи в молекуле углеводородного топлива не разрываются, но возбужденная молекула становится активной частицей с повышенной реакционной способностью и длительным (исчисляемым часами) временем существования в возбужденном состоянии [65, 76]. Такое время существования активной частицы (по мнению авторов [65, 76] может объяснить длительность деструкции молекул декана после прекращения действия электрического поля. Энергии электрического поля камеры ЭУВТ достаточно для того, чтобы образовать каждую секунду в процессе деструкции до $3,6 \cdot 10^{13}$ активных частиц – радикалов. Учитывая скорость столкновений радикалов с молекулами, которая составляет около 10^9 с^{-1} , их оказывается достаточно для деструкции 44% молекул декана и других молекул, даже, несмотря на их убыль в результате столкновений со стенками камеры и химических реакций с обрывом цепей [65, 76].

В [65, 76] отмечается, что для молекулярной модификации углеводородных топлив не требуется значительная мощность электрического поля. Электрическое поле участвует в деструкции и возбуждении различных маятниковых и валентных колебательных уровней у относительно небольшого числа молекул, превращая их в активные частицы, которые, вступая в химические реакции с исходными молекулами топлива, могут подвергать их деструкции. При сгорании топлива энергия, затрачиваемая на дезинтеграцию возбужденных и подвергшихся деструкции молекул меньше энергии, затрачиваемой на дезинтеграцию молекул в основном состоянии. Поэтому доля тепловой энергии реакции окисления топлива, превращенной в полезную работу, увеличивается. Таким образом, теплота сгорания топлива повышается.

При молекулярной модификации углеводородного топлива скорость образования радикалов определяется напряженностью и частотой электрического

поля. Напряженность поля определяет концентрацию активных частиц, возникающих при каждом импульсе, а частота определяет скорость генерации активных частиц.

В [76,65] приведены результаты (см. таблицы 2.20, 2.21) экспериментальных исследований по влиянию однородного переменного электрического поля на групповой состав бензинов «Лукойл АИ-95-4» и «Газпромнефть АИ-95-4».

Из таблиц 2.20 – 2.21 следует, что переменное однородное электрическое поле изменяет физико-химические показатели исследуемых образцов бензинов, что косвенно подтверждает активацию топлива. При этом наблюдалось [76] снижение детонационной стойкости бензина на 0,1...0,5 единицы октанового числа. Уменьшение октанового числа является прямым следствием снижения стабильности топлива, следовательно – его активации. Степень активации зависит от группового состава исходного топлива, в частности – от содержания в нем ароматических углеводородов и оксигенатов. При увеличении в топливе содержания оксигенатов, степень снижения октанового числа уменьшается. Так, для топлива «Лукойл», содержащего в исходном составе 2,7 % оксигенатов, снижение октанового числа составило практически 0,5 единицы исследовательского октанового числа (ОЧИ), тогда как для топлива «Газпромнефть», содержащее практически 10 % оксигенатов, при сопоставимой интенсивности обработки снижение ОЧИ составило 0,1...0,3 единицы ОЧИ в зависимости от интенсивности обработки топлива.

Измерение ОЧИ производилось на установке УИТ-65 согласно ГОСТ 8226.

На основании проведенных исследований разработаны принципиально новые методы повышения эффективности распыла углеводородного топлива и сгорания топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях, новизна и полезная значимость которых подтверждена выдачей 6 патентов Российской Федерации на изобретения [16-18, 20-22].

Таблица 2.20 - Расширенный групповой состав бензина «Лукойл АИ-95-4» до и после обработки однородным переменным электрическим полем

Группа углеводородов	До обработки полем	После обработки полем
Парафины, объем. %	8,682	8,594
Изопарафины, объем. %	38,334	38,264
Ароматика, объем. %	32,112	32,636
Нафтены, объем. %	5,417	5,443
Олефины, объем. %	9,888	9,465
Оксигенаты, объем. %, из них:	2,729	2,784
МТБЭ	2,449	2,309
Метанол	-	-
Пропанол	-	-

Таблица 2.21 - Расширенный групповой состав бензина «Газпромнефть АИ-95-4» до и после обработки однородным переменным электрическим полем

Группа углеводородов	До обработки полнм	После обработки полем
Парафины, объем. %	10,558	9,819
Изопарафины, объем. %	39,167	39,341
Ароматика, объем. %	28,937	31,014
Нафтены, объем. %	4,620	4,780
Олефины, объем. %	4,723	6,380
Оксигенаты, объем. %, из них:	9,886	6,400
МТБЭ	2,607	2,410
Метанол	6,710	4,064
Пропанол	0,871	0,473

2.6 Выводы по разделу

1. Теоретически исследовано влияние электрического заряда капель топлива на вязкость и поверхностное натяжение капель. Получена безразмерная формула зависимости поверхностного натяжения капли топлива от величины заряда, (хорошо отображающая результаты экспериментов), положенная в основу дальнейших численных расчетов.

2. Теоретически исследованы в статике и динамике процессы сообщения униполярного электрического заряда каплям топлива в топливновоздушной смеси на выходе форсуночных модулей в поле коронного разряда.

3. Теоретически проанализированы методы сообщения униполярного заряда потокам и струям топлива в резко неоднородных электрических полях. Показаны пути достижения конструктивными методами максимальной плотности объемного электрического заряда в резко неоднородном электрическом поле в потоке углеводородного топлива в форсуночных модулях. Целесообразно для этого выбирать электродную систему ЭУВТ с игольчатыми электродами с минимальным радиусом закругления острия.

4. Разработана методология уточнения инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле форсуночных модулей применительно к форсуночным модулям электропневматическим форсункам авиационных двигателей. Показано, что разработанная методология может быть применима как к ЭУВТ, конструктивно реализованном в самой топливной форсунке (электропневматическая форсунка), так и в ЭУВТ, включенном в гидравлическую цепь питания непосредственно на входе топлива в форсунку.

5. Реализована (на модельной задаче создания в рабочей жидкости резко неоднородного поля между электродами типа «игла – плоскость с отверстием») методология уточнения инжекционной модели образования в керосине объемного униполярного электрического заряда с использованием

суперкомпьютерных вычислений на базе уравнений электрогидродинамики с последующей верификацией экспериментом.

6. Разработана (для модельной задачи) электрогидродинамическая модель, проведено численное ее исследование и уточнена инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в керосине у игольчатого электрода в резко неоднородном поле.

7. Показано, что численные расчеты по уточненной инжекционной модели в диапазоне изменений электрического напряжения на электродах (0 – 15) кВ с точностью до 2 % совпадают с экспериментальными данными. На этом основании даны рекомендации использования разработанных электрогидродинамической модели, методики ее численных исследований и полученной уточненной инжекционной модели для дальнейших исследований электрических устройств воздействия на топливо (ЭУВТ) в форсуночных модулях.

8. Для уточнения коэффициентов инжекционной модели образования униполярного заряда в керосине в электропневматической форсунке разработана методология верификации экспериментом результатов расчета вольт-амперной характеристики и впервые экспериментально снята вольт-амперная характеристика впервые разработанной и изготовленной электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя.

9. На основании результатов по п.7 настоящих выводов разработана расчетная модель и методика численного расчета для определения вольт-амперных характеристик реальной впервые созданной электропневматической форсунки газотурбинного авиадвигателя.

10. Проведен сравнительный анализ результатов суперкомпьютерных вычислений и экспериментальных результатов для вольт-амперных характеристик реальной новой электропневматической форсунки и показано их хорошее совпадения. Уточнена инжекционная модель в реальной разработанной ЭПФ образования униполярного электрического заряда в керосине. Данная уточненная инжекционная модель в дальнейшем будет использована для

исследования электрогидродинамических процессов распыла топлива электропневматической форсункой.

11. Разработаны (на базе проведенного анализа современной научно-технической литературы) электрофизические основы повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливновоздушной смеси в авиационных двигателях с использованием в ЭУВТ переменных однородных электрических полей.

12. Предложены новые патентозащищенные методы повышения эффективности указанных выше процессов в авиационных двигателях. По результатам исследований получено 6 патентов Российской Федерации [16-18, 20-22], что официально подтверждает мировую новизну и практическую значимость разработанных методов повышения эффективности процессов распыла углеводородного топлива и горения топливновоздушной смеси в авиационных двигателях.

3 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1 Критерии и показатели эффективности направлений исследований по разработке электрокаплеструйных форсуночных модулей

При формулировке критериев и показателей эффективности возможных направлений исследований исходим из того, что объектом исследований и разработок в данной диссертации являются форсуночные модули, включающие в себя как электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ), так и собственно топливную форсунку.

Критерием эффективности функционирования форсуночных модулей является улучшение качества распыла топлива, которое, в свою очередь, влияет на процессы сгорания топливновоздушной смеси.

Качество распыла топлива оценивается, в частности, по следующим показателям:

- величина угла топливного факела на выходе форсунки;
- получение минимального диаметра капель распыливаемого топлива на выходе форсунки;
- однородностью распределения топлива в топливновоздушной смеси;
- интегральными показателями улучшения процессов горения топливновоздушной смеси в камере сгорания авиационного двигателя.

Качество сгорания топливновоздушной смеси оценивается, в частности, по следующим показателям:

- химический состав продуктов сгорания на выходе камеры сгорания;
- характеристики температуры газа (продуктов сгорания);
- характеристики «бедного» срыва пламени в камере сгорания.

Поэтому достижение этих критериев и показателей целесообразно осуществлять как совершенствованием конструкции собственно топливной

форсунки, так и совершенствованием способов воздействия электрическими полями на топливо авиационных двигателей.

Для газотурбинных авиационных двигателей при исследованиях за основу взята (как отмечалось в предыдущих главах) топливная пневматическая форсунка для камер сгорания богато-бедного типа авиационных двигателей (типа ПД-14). При этом необходимо стремиться максимально улучшить сформулированные выше показатели распыла топлива и горения топливно-воздушных смесей. Эта форсунка будет являться базовой при разработке форсуночных модулей с ЭУВТ. А с применением соответствующим образом организованных электрических полей (с ЭУВТ) при разработке электрокаплеструйные форсуночных модулей предполагается еще более улучшить показатели распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси на базе этой форсунки.

Сложность решения поставленной задачи улучшение распыла и горения с использованием электрических полей заключается в том, что применительно к штатному топливу авиационных двигателей – керосину и к самим авиационным двигателям эта задача решается впервые. Последнее подтвердили результаты проведенных патентных и библиографических исследований.

3.2 Стратегия исследований и разработок электрокаплеструйных форсуночных модулей

Решаемая задача – разработка методов воздействия электрических полей на топливо (керосин) в форсуночных модулях авиационных двигателей с целью повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси.

В рамках решения этой задачи создана стратегия исследований и разработок форсуночных модулей, включающих в себя собственно топливную форсунку и ЭУВТ:

- а) В основу ее положена разработанная новая технология обеспечения конкурентоспособности на рынке результатов данной работы – **динамическое**

конструирование. Динамическое конструирование – это этап проектирования топливных форсунок и форсуночных модулей, на котором на основании результатов численного моделирования выбираются конструктивные, гидродинамические, газодинамические, электрогидро(газо)динамические, электрические параметры, обеспечивающие требуемые параметры распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси;

б) Для реализации целей динамического конструирования необходимо разработать численные модели применительно к разрабатываемым форсункам (как элементам форсуночных модулей) и форсуночным модулям. При этом данные численные модели должны наиболее точно соответствующие функционированию реальных устройств авиационных двигателей. Существующие модели, как правило, не удовлетворяют данным требованиям;

в) Для выполнения п.п. *а, б* необходимо разработать уточненные математические модели процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси. Данные математические модели должны взаимосвязывать конструктивные, гидродинамические, газодинамические, электрогидро(газо)динамические, электрические параметры рассматриваемых устройств;

г) При реализации принципов динамического конструирования по п.п. *а-в* обеспечивается не только патентоспособность и конкурентоспособность разрабатываемых форсуночных модулей на рынке, но и закладывается в их конструкцию целый ряд «ноу-хау» за счет оптимального выбора взаимосвязанных параметров, имеющих свою ценность на рынке;

д) ЭУВТ могут быть включены в гидравлическую цепь питания топливной форсунки [17,18]. При этом конструкция форсунки остается штатной или доработанной с позиций обеспечения требуемых параметров распыла топлива;

е) ЭУВТ могут являться конструктивным элементом (ее электродная часть) топливной пневматической форсунки [16, 20-22];

ж) При реализации п.е необходимо стремиться к конструктивному решению, при котором при снятии напряжения с электродов пневматической

форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды уже электропневматическая форсунка работает как форсуночный модуль. Следовательно, необходимо стремиться в одном конструктивном устройстве реализовать функции пневматической и электропневматической форсунок;

з) Электрическое поле, создаваемое в топливе между электродами, может быть однородным переменным [17,18], неоднородным переменным, резко неоднородным переменным или/и постоянным [16, 20-22];

и) В качестве базового типа топливной форсунки газотурбинных авиационных двигателей принята пневматическая форсунка для камер сгорания богато-бедного типа применительно к авиадвигателю типа ПД-14 или ПД-35.

к) При выполнении п.п. *а-ж* закладывается основа патентоспособности всех разработок для обеспечения юридической защиты на рынке этих разработок.

В свою очередь, при выполнении п. *и* разрабатываемая пневматическая форсунка в составе форсуночных модулей по своим геометрическим размерам и расходной характеристике должен полностью соответствовать форсунке данного типа авиационного двигателя (в нашем случае - ПД-14).

Применяемые материалы, сплавы и уплотнения должны обеспечивать надежную работу электропневматической (пневматической) форсунки при температуре воздуха до 600 градусов Цельсия и перепаде давления по топливу до 25атм.

Расходная характеристика электропневматической (пневматической) форсунки авиадвигателя должна обеспечивать все режимы работы двигателя при перепаде давлений топлива на форсунке не более 25 атм. При этом перепад давления воздуха на стенке жаровой трубы составляет порядка 3 %.

Таким образом, при разработке форсуночных модулей дорабатываются (на базе результатов численных исследований) в их составе пневматические форсунки для камер сгорания богато-бедного типа применительно к авиадвигателю ПД-14.

В свою очередь, в зависимости от положенных в их основу физических

эффектов при воздействии электрических полей на топливо разработаны различные варианты возможных решений по конструкциям форсуночных модулей с целью повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси. Если используются эффекты воздействия переменных электрических полей на молекулы топлива (керосина) [17,18], то в конструкции форсуночных модулей организуются однородные или неоднородные переменные электрические поля. Если топливу сообщается униполярный электрический заряд [16, 20-22], то в конструкции форсуночных модулей создаются резко неоднородные электрические поля. Как вариант, можно в форсуночных модулях одновременно воздействовать электрическим полем на молекулы топлива и создавать в топливе униполярный электрический заряд [16].

Для того, чтобы в конечном итоге обеспечить требуемые параметры распыла топлива и повысить эффективность процессов горения топливно-воздушных смесей в авиационных двигателях, необходимо, как уже отмечалось выше, разработать численные модели применительно к разрабатываемым форсункам и электрокаплеструйным форсуночным модулям, наиболее точно соответствующие функционированию реальных устройств. Тогда на их базе, проводятся численные исследования влияния конструктивных, гидроаэродинамических, электрических параметров на параметры распыла и горения с целью их рационального выбора по оптимизации этих параметров.

В свою очередь, для создания указанных численных моделей необходимо исследовать ряд модельных задач, наиболее характерных для физических процессов функционирования пневматических форсунок и электрокаплеструйных форсуночных модулей. И уже на базе полученных результатов решения модельных задач совершенствовать численные модели электрокаплеструйных форсуночных модулей.

3.3 Разработка принципов и методологии построения электрокаплеструйных форсуночных модулей с улучшенными качественными показателями распыла углеводородного топлива по сравнению с существующими конструкциями

Выше изложены основные этапы предложенной стратегии исследований и разработок форсуночных модулей (см. подраздел 3.2) с позиций обеспечения их патентоспособности и конкурентоспособности на рынке. В частности, по данной стратегии ЭУВТ может быть включено в цепь питания топливной форсунки [17,18] или являться конструктивным элементом (ее электродная часть) топливной форсунки [16, 20 - 22].

В первом случае конструкцию штатной форсунки авиадвигателя необходимо доработать по результатам численных исследований на основе высокоточного математического моделирования на суперкомпьютерных вычислительных кластерах. Эти доработки осуществляются с позиций обеспечения требуемых параметров распыла топлива с верификацией экспериментом результатов численных расчетов.

Во втором случае методика остается такой же, как и в первом случае. Но кроме того необходимо стремиться к конструктивному решению, при котором при снятии напряжения с электродов форсунка работает как доработанная пневматическая форсунка, а при подаче напряжения на электроды работает как электропневматический форсуночный модуль (электропневматическая форсунка).

В остальном методологии разработки форсуночных модулей осуществляется в соответствии с п. 3.2 настоящего раздела.

На основе созданной методологии разработаны принципиально новые методы улучшения показателей распыла углеводородного топлива и горения топливновоздушной смеси в авиационных двигателях, а также форсуночные модули. Мировая новизна и практическая значимость этих разработок подтверждены 6 патентами Российской Федерации [16-18, 20- 23].

3.3.1 Разработка методов построения электрокаплеструйных форсуночных модулей авиадвигателей с использованием переменных однородных электрических полей

3.3.1.1 Метод повышения эффективности сгорания топлива в авиадвигателе с включением электрического устройства воздействия на топливо в гидравлическую цепь питания топливной форсунки

Показано (см. 1 главу настоящей диссертации), что применительно к авиационным двигателям, работающим на техническом керосине, использование электрических полей для повышения эффективности процессов распыла и сгорания топлива, производится впервые. Однако при разработке методов построения форсуночных модулей с улучшенными качественными показателями распыла и сгорания топлива исходим из того, что для их патентной защиты они должны отличаться от известных, применяемых к другим типам двигателей, например, в двигателях внутреннего сгорания

Известны различные методы повышения эффективности сгорания углеводородного топлива в ДВС путем его обработки перед сжиганием [265].

По одному из них в дизельном двигателе внутреннего сгорания дизельное топливо дополнительно подвергают вторичной обработке электрическим полем в камере, в которой испарившийся пар диссоциирует на водород и кислород, поступающие в цилиндры в смеси с топливом и улучшающие процесс его горения [патент РФ № 2011881, МПК F02M 27/04, БИ №8, 1994]. Недостатками известного метода являются невысокое качество обработки, многооперационность и конструктивная сложность устройств, его реализующих.

Известен метод электрической обработки жидкого топлива, по которому на электроды, размещенные в корпусе, подают высокое напряжение порядка 20-25 кВ. Далее поток топлива под действием электрического поля разделяют на два разноименных заряженных потока. Положительный поток подают на смешение с воздухом, а отрицательный выводят в бак [патент РФ № 2032107, МПК F02M 27/04, БИ №9, 1995]. Недостатками известного метода являются большие энергозатраты, использования высокого напряжения, а также конструктивная сложность устройств, его реализующих.

Известен метод повышения эффективности сгорания топлива путем обработки жидких и/или газообразных сред, по которому в полости обработки создается резко неоднородное в пространстве электрическое поле с использованием высоковольтного источника напряжения. Дополнительно, посредством введения постоянных магнитов с чередующейся полярностью создают неоднородное в пространстве постоянное магнитное поле, воздействие которого усиливается применяемым магнитным экраном [патент РФ № 2093699, МПК F02M 27/04, БИ №29, 1997]. Недостатками известного метода являются недостаточная эффективность, использование высокого напряжения и сложность конструкции устройств, его реализующих.

Известен метод интенсификации работы двигателя внутреннего сгорания, заключающийся в том, что топливо и окислитель предварительно обрабатывают в сильном электрическом поле с напряженностью большей или равной 1 кВ/см (10^5 В/м) (с напряжением на электродах до 30000 В [227,228]), воспламеняют подаваемую в камеру сгорания топливовоздушную смесь и воздействуют на нее сильным электрическим полем [патент РФ № 2126094, МПК F02M 27/04, опубл. 20.09.1999г.]. Недостатками известного метода является использование высокого напряжения для создания сильных электрических полей, а также конструктивная и технологическая сложность, требующая существенных конструктивных изменений в существующих топливных системах транспортных средств.

Наиболее близким к разработанному методу [17] и принятым в качестве прототипа является метод повышения эффективности сгорания углеводородного топлива [патент РФ № 2469205, МПК F02M 27/04], по которому уменьшают размеры капель топлива при его распылении из форсунки путем создания в потоке топлива перед форсункой между электродами типа «сетка-сетка» продольного к потоку топлива постоянного электрического поля с высокой напряженностью 800 – 1500 В/мм ($((8 - 15) 10^5$ В/м) и с временем воздействия электрического поля на топливо 5 – 15 с. Далее по данному методу получают топливовоздушную смесь и обеспечивают ее горение. При этом на электроды подают постоянное высоковольтное напряжение. В качестве топлива в прототипе

применяли при экспериментах дизельное топливо и бензин, смешанный с 20 % этилового спирта.

Недостатком данного метода повышения эффективности сгорания углеводородного топлива является то, что он предусматривает использование очень сильных электрических полей, высоковольтного напряжения, требует высокой очистки топлива для исключения засорений сеток-электродов, использование специального топлива, сложность конструкции устройств, его реализующих, и затратность.

Технической задачей, на решение которой направлен разработанный метод [17], является улучшение параметров каплеобразования на выходе топливной форсунки, получение мелкодисперсной топливовоздушной смеси, интенсификация процессов горения топливовоздушной смеси, что приведет к более полному ее сгоранию и к снижению уровня токсичности выходных продуктов горения, повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности двигателя.

Указанный технический результат достигается тем, что изменяют частоту переменного низковольтного (10 – 600 В) напряжения на электродах и выбирают частоту создаваемого в углеводородном топливе поперечного к потоку топлива однородного электрического поля относительно малой напряженности, при которой диэлектрические потери в углеводородном топливе (керосине) максимальны и тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$ будет максимальным. При этом выбирают частоту переменного электрического поля обратную времени релаксации возбужденных электрическим полем молекул в топливе и обрабатывают углеводородное топливо электрическим полем перед его подачей в форсунку.

В основу предлагаемого метода [17] положены следующие физикохимические явления [17, 39, 40, 65, 76].

Углеводородное топливо состоит из ряда компонентов, в частности в его химический состав входит декан. Имеющиеся в литературе результаты исследований показывают, что после воздействия на декан слабого переменного

электрического поля концентрация декана уменьшается почти вдвое, а через сутки после прекращения действия поля – еще почти вдвое. Под воздействием переменного электрического поля и после его воздействия декан может дать три дочерних продукта: тетрагидрометилфуран, метилпентан и изометилпентан, которые под воздействием на них переменного электрического поля также подвергаются деструкции, продуктами которой при сохранении атомарного состава, должны быть этилен C_2H_4 и пропилен C_3H_6 . Продукты с углеродным скелетом $C_2 - C_6$, обладают большей теплотой сгорания, чем исходная молекула декана с углеродным скелетом C_{10} . При деструкции молекулы декана $C_{10}H_{22}$ с образованием двух молекул тетрагидрометилфурана C_5H_{10} должны образовываться два свободных атома водорода. Свободный водород может возникнуть так же при деструкции метилпентана и изометилпентана. Образование свободного водорода и перенос его вместе с жидким топливом в камеру сгорания ускоряет химическую реакцию окисления. Она протекает быстрее и полнее, так как наличие активных центров в виде атомарного водорода в зоне горения уменьшает среднее значение энергии активации. Высокая реакционная способность атомарного водорода приводит к тому, что эти центры определяют механизм реакции окисления и ее скорость.

На рисунке 3.1 схематически показана «потенциальная яма» $C - C$ связи в молекуле углеводорода.

Как известно, энергетические уровни в «потенциальной яме» квантуются. Механизмом возникновения активных частиц под действием переменного электрического поля является возбуждение колебательных уровней молекул. При возбуждении колебательных уровней $C - C$ и $C - H$ связи в молекуле не разрываются, но возбужденная молекула становится активной частицей с повышенной реакционной способностью и длительным (исчисляемым часами) временем существования в возбужденном состоянии. Такое время существования активной частицы может объяснить длительность деструкции молекул декана после прекращения действия электрического поля.

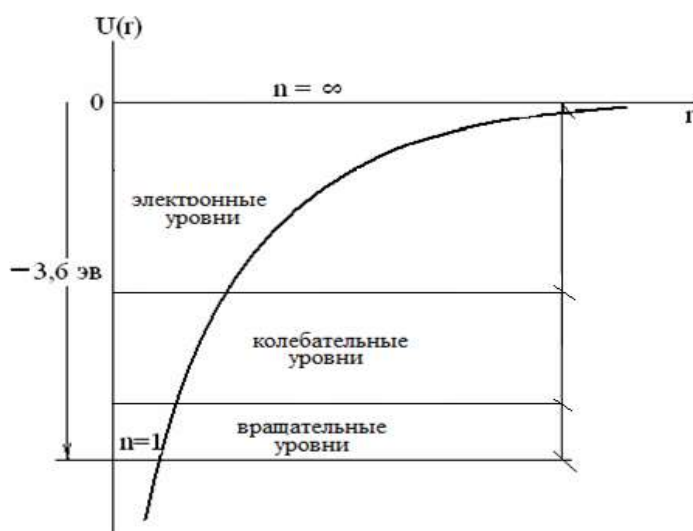


Рисунок 3.1 – Энергетические уровни C – C связи в молекуле углеводорода

Для молекулярной модификации углеводородных топлив (см. главы 1 и 2 настоящей диссертации) не требуется значительная мощность переменного электрического поля. Электрическое поле участвует в деструкции и возбуждении различных маятниковых и валентных колебательных уровней у относительно небольшого числа молекул, превращая их в активные частицы, которые, вступая в химические реакции с исходными молекулами топлива, могут подвергать их деструкции. По мере увеличения энергии переменного электрического поля, могут быть последовательно возбуждены вращательные и колебательные уровни. При этом для каждого следующего перехода электрона на выше расположенный колебательный энергетический уровень требуется относительно небольшая энергия. Таким образом молекула переходит из стабильного состояния с временем жизни $t = \infty$ в метастабильное состояние, и становится активной частицей, способной к самостоятельному размножению за счет химических реакций с исходными молекулами топлива.

При этом находит объяснение кратковременность существования эффекта от воздействия на углеводороды постоянного электрического поля, что имеет место в известных способах повышения эффективности сгорания углеводородных

топлив. Это объясняется резонансным характером поглощения энергии молекулами. Поэтому неизменная энергия постоянного поля имеет меньшую вероятность возбуждения у молекул колебательных уровней.

Энергия переменного поля, увеличиваясь дважды за период, непрерывно проходит все значения от нуля до максимума, в том числе и резонансные значения энергии возбуждения колебательных уровней. Под воздействием постоянного электрического поля возбуждаются в основном только вращательные уровни молекул. Поэтому продолжительность эффекта увеличения теплоты сгорания топлива, подвергнутого обработке постоянным электрическим полем составляет не более 1,5 часов, в то время как воздействие переменного сказывается в течение многих часов после прекращения его действия.

Итак, в результате деструкции молекул топлива под действием слабых переменных электрических полей возникают химические радикалы, обладающие большой реакционной способностью. Радикалы, взаимодействуя с молекулами, находящимися в основном состоянии, подвергают их деструкции, усиливая действие переменного электрического поля. В свою очередь, возбуждение у молекул маятниковых и валентных колебаний переводит их в длительное метастабильное состояние. В этом состоянии молекулы так же становятся активными частицами цепных химических реакций окисления с разветвлением цепей. При сгорании топлива энергия, затрачиваемая на дезинтеграцию возбужденных и подвергшихся деструкции молекул меньше энергии, затрачиваемой на дезинтеграцию молекул в основном состоянии. Поэтому доля тепловой энергии реакции окисления топлива, превращенной в полезную работу, увеличивается. Таким образом, теплота сгорания углеводородного топлива повышается.

Чем больше концентрация молекул топлива, с которым взаимодействует переменное электрическое поле, тем большая частота поля требуется для эффективной деструкции его молекул. При уменьшении массы молекул для увеличения или поддержания этого отношения постоянным, необходимо увеличить частоту генератора электрического поля, которая определяет скорость генерации

активных частиц. При молекулярной модификации углеводородного топлива скорость образования радикалов определяется напряженностью и частотой электрического поля. Напряженность поля определяет концентрацию активных частиц, возникающих при каждом импульсе, а частота определяет скорость генерации активных частиц.

Для увеличения эффективности сгорания углеводородных топлив необходимо, прежде всего, обоснованно выбрать соответствующую частоту переменного низковольтного напряжения при выбранном (заданном) напряжении на электродах. Причем этот выбор должен базироваться на возможности измерения существующими приборами таких физических величин, которые наиболее достоверно характеризуют процессы, происходящие в углеводородном топливе при приложении к нему переменного электрического поля. Такой физической величиной являются диэлектрические потери в топливе при приложении к нему переменного электрического поля, характеризующие возбуждение полем вращательных и колебательных энергетических уровней молекул углеводородного топлива. Они характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь в углеводородном топливе $tg\delta$. Здесь δ — угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи, образованной источником напряжения и электродами модификатора с размещенным между ними углеводородным топливом. Величина $tg\delta$ является важной измеряемой характеристикой диэлектриков вообще, и углеводородных топлив, в частности. Чем больше $tg\delta$, тем более высокие (при прочих равных условиях) диэлектрические потери. Для наиболее широко применяемых диэлектриков $tg\delta$ имеет значение в пределах от 0,0001 до 0,03.

Поскольку углеводородное топливо является многокомпонентной химической средой, содержащей примеси, то его можно рассматривать как слабый полярный диэлектрик.

При переменном напряжении диэлектрические потери возникают под действием, как тока сквозной проводимости, так и релаксационных видов поляризации и процессов возбуждения полем вращательных и колебательных

энергетических уровней молекул углеводородного топлива. В сильных электрических полях (в постоянном и переменном) дополнительно возникают ионизационные потери.

Величина активной мощности P , рассеиваемой в углеводородном топливе при приложении к нему переменного электрического поля, равна $P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$, где U – электрическое напряжение на электродах, между которыми находится углеводородное топливо; C – электрическая емкость конденсатора, образованного электродами с находящимся между ними топливом; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота приложенного к электродам переменного напряжения с частотой f в герцах. Следовательно, величина рассеиваемой мощности (диэлектрические потери) зависит от квадрата приложенного напряжения, его частоты, емкости и $\operatorname{tg} \delta$ топлива. Емкость C , в свою очередь, зависит от конструктивного исполнения электродной системы ЭУВТ и диэлектрической проницаемости \mathcal{E} углеводородного топлива, а диэлектрическая проницаемость \mathcal{E} и $\operatorname{tg} \delta$ зависят от типа углеводородного топлива (его химического состава и структуры). В свою очередь $\operatorname{tg} \delta$ имеет четко выраженную сильную зависимость при заданной температуре от частоты приложенного к топливу переменного электрического поля (переменного напряжения на электродах модификатора). Причем диэлектрические потери, вызванные дипольно-релаксационными потерями и релаксационными потерями при возбуждении вращательных и колебательных энергетических уровней молекул в топливе в переменных электрических полях, характеризуются наличием взаимосвязанных максимумов на температурной и частотной зависимостях $\operatorname{tg} \delta$, определяемых временем релаксации τ . Положение максимума $\operatorname{tg} \delta$, обусловленного дипольно-релаксационными потерями и релаксационными потерями при возбуждении вращательных и колебательных энергетических уровней молекул, на кривых зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты определяется из условия $\omega = 1/\tau$. Последнее не противоречит известному теоретическому положению применительно к изоляционным материалам [230].

При этом $\operatorname{tg} \delta$ имеет значения $\sim 10^{-3}$ — 10^{-2} и более.

В разработанном методе [17] измеряется только максимум $tg\delta$, но не измеряется τ , поскольку максимуму тангенса угла диэлектрических потерь в топливе соответствует выбираемая частота переменного напряжения на электродах модификатора топлива.

Методика измерения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ применительно к диэлектрикам гостирована (см., например, ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц; ГОСТ 22372-77(СТ СЭВ 3164-81 и СТ СЭВ 3166-81).

Средства и приемы измерения тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ в настоящее время разработаны и серийно выпускаются соответствующие приборы [38]. Причем $tg\delta$ может быть измерен с высокой точностью различными приборами, в том числе, с использованием персональных компьютеров [231].

В разработанном методе [17] повышения эффективности сгорания углеводородного топлива при его реализации осуществляют следующие операции:

- изменяют частоту переменного низковольтного напряжения на электродах;

- выбирают частоту создаваемого в топливе поперечного к потоку топлива однородного электрического поля, при которой диэлектрические потери в углеводородном топливе будут максимальны;

- измеряют тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ в углеродном топливе и выбирают частоту переменного электрического поля, при которой $tg\delta$ будет максимальным;

- обрабатывают углеводородное топливо переменным электрическим полем перед его подачей в форсунку путем изменением низковольтного переменного напряжения на электродах, между которыми находится топливо, с частотой, соответствующей максимальному $tg\delta$.

При этом максимальному тангенсу угла диэлектрических потерь $tg \delta$ будет соответствовать круговая частота переменного напряжения на электродах, обратная времени релаксации возбужденных электрическим полем молекул в топливе.

Характерными особенностями и преимуществами перед прототипом разработанного способа [17] являются:

– использование вместо высоковольтного постоянного напряжения (прототип) низковольтного переменного электрического напряжения на электродах, что позволяет увеличить эффективность сгорания топлива (см. выше) с одновременным упрощением конструкции устройств, реализующих предлагаемый способ;

– в разработанном методе создают переменное относительно слабое электрическое поле в поперечном направлении к потоку углеводородного топлива, тогда как в прототипе создают продольное к потоку топлива постоянное сильное электрическое поле, что усложняет конструкцию реализующих известный способ устройств и увеличивает гидравлическое сопротивление электродной системы потоку топлива;

– в разработанном методе информативным параметром оптимальности процессов сгорания углеводородного топлива (керосина) является параметр, который можно измерить существующими приборами, а именно – максимальный для выбранного (заданного) вида углеродного топлива тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$.

Данная величина $tg \delta$ соответствует определенной частоте напряжения на электродах, что дает возможность выбрать оптимальную частоту напряжения на электродах, равную максимальному значению $tg \delta$. Это принципиально невозможно реализовать в известных способах, в том числе и в прототипе.

Для подтверждения эффективности разработанного метода (с учетом многообразия электрофизических явлений) проведены стендовые испытания влияния низковольтного (до 400 В) переменного напряжения на коаксиальных

электродах, между которыми протекает дизельное топливо, на процессы смесеобразования и сгорания в дизельном двигателе. Стендовые испытания двигателей внутреннего сгорания выполнены в аттестованной лаборатории СДС ГСМ-FLM № РОСС. RU.04ХД.ИЛ 001 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, уполномоченной производить работы по моторным испытаниям топлив, смазочных масел и автохимии. Испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» [264]. Для анализа получаемых эффектов были введены промежуточные баллы мощности, экономичности, эффективного к.п.д., рассчитываемые как усредненные проценты отклонения параметров дизельного двигателя, полученных при работе на испытуемом дизельном топливе, прошедшем обработку между электродами с подачей на них переменного низковольтного напряжения с изменяющейся частотой, относительно эталонного. Усреднение проводилось по 20 режимам нагрузочных характеристик. Результаты испытаний дизельного двигателя сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Усредненные эффекты (%) при пропуске дизельного топлива между коаксиальными электродами, на которые подавалось низковольтное переменное напряжение (до 400 В) с изменяющейся частотой, до его подачи в камеру сгорания дизельного двигателя

	Усредненные эффекты, % относительно базы					
	Расход топлива	Эффективный к.п.д.	СО	СН	NOx	Дым
С низковольтным переменным напряжением на коаксиальных электродах с изменяющейся частотой	- 6,2	+ 6,2	- 5,4	- 6,8	+ 5,3	- 24,0

Аналогичные испытания были проведены на бензиновом двигателе с впрыском топлива типа ВАЗ-2111. Для анализа полученных эффектов были введены промежуточные баллы мощности, экономичности, эффективного к.п.д., токсичности отдельно по компонентам СО, СН, NO_x, рассчитываемые как усредненные проценты отклонения параметров двигателя, полученных при работе на испытуемом бензине А-95, прошедшем обработку между электродами с подачей на них переменного низковольтного напряжения с изменяющейся частотой, относительно эталонного. Усреднение проводилось по 27 режимам нагрузочных и внешней скоростной характеристик.

Результаты расчета показателей качества сгорания топливовоздушной смеси, замеренных и рассчитанных по итогам испытаний, сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Усредненные эффекты (%) при пропуске бензина АИ-95 между коаксиальными электродами, на которые подавалось низковольтное переменное напряжение (до 400 В) с изменяющейся частотой, до его подачи на форсунку в двигателе ВАЗ-2111 с впрыском топлива.

	Усредненные эффекты, % относительно базы				
	Расход топлива	Эффективный к.п.д.	СО	СН	NO _x
С низковольтным переменным напряжением на коаксиальных электродах с изменяющейся частотой	- 6,6	+ 5,8	- 3,3	- 11,5	+ 4,2

В таблице 3.1 и таблице 3.2 знак «минус» означает снижение соответствующего показателя (в процентах) при воздействии на поток углеводородного топлива поперечного к потоку переменного электрического поля с изменяющейся частотой по сравнению с исходным необработанным электрическим полем топливом, а знак «плюс» - увеличение показателя.

Таким образом, экспериментально подтверждено применительно к дизельному двигателю и автомобильному двигателю с впрыском топлива увеличение эффективности сгорания углеводородного топлива при приложении к потоку топлива поперечного переменного электрического поля с изменяющейся частотой. В первом случае в качестве топлива использовалось дизельное топливо, во втором – автомобильный бензин типа А-95.

При реализации данного [17] метода повышения эффективности сгорания топлива нет необходимости изменять оптимизированную конструкцию собственно форсунки авиадвигателя, поскольку ЭУВТ (его электродная часть) включается в цепь подачи топлива непосредственно перед топливной форсункой. Это является несомненным достоинством разработанного способа.

3.3.1.2 Метод повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолета без дополнительных конструктивных и технологических изменений в штатной топливной системе авиадвигателя

Данный разработанный метод повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолета [18] является развитием метода [17], рассмотренного в предыдущем параграфе.

В методе повышения эффективности сгорания топлива [17] не предусматривается дополнительных конструктивных и технологических изменений в штатной (оптимизированной) топливной форсунке самолета. Но при его реализации необходимо в напорной топливной магистрали подачи топлива непосредственно перед форсункой разместить электродную систему ЭУВТ.

Следовательно, в систему подачи топлива к форсунке потребуется внести соответствующие конструктивные изменения.

Разработанный метод повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолета [18] вообще не предусматривает никаких конструктивных и технологических изменений в штатной топливной системе авиадвигателя.

Технической задачей, на решение которой направлен разработанный способ [18], является улучшение *без дополнительных конструктивных и технологических изменений в штатной топливной системе авиадвигателя* параметров каплеобразования на выходе топливной форсунки, получение мелкодисперсной топливовоздушной смеси, интенсификация процессов горения топливовоздушной смеси. Все это приведет к более полному ее сгоранию и к снижению уровня токсичности выходных продуктов горения, повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности авиадвигателя.

Указанный технический результат достигается тем, что топливо при заправке самолета вначале из заправочной емкости перекачивают в переменном однородном электрическом поле в течение 30 - 40 минут в дополнительную емкость. При этом изменяют частоту переменного низковольтного (10 – 600 В) напряжения и создают в топливе поперечное к потоку топлива однородное электрическое поле относительно малой напряженности, при которой диэлектрические потери в углеводородном топливе максимальны и тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$ будет максимальным. Далее обработанное таким образом в электрическом поле топливо из дополнительной емкости направляют непосредственно перед вылетом самолёта в топливный бак авиадвигателя и, используя штатную систему топливоподачи самолета, через напорный топливопровод подают к форсунке. Распыливают топливо в форсунке и обеспечивают горение топливно-воздушной смеси в камере сгорания. Таким образом, никаких дополнительных технологических и конструктивных изменений в системы топливоподачи, распыла, смесеобразования и сгорания не вносится, а используются штатные системы авиадвигателя.

В основу предлагаемого метода положены следующие физико-химические явления.

Углеводородное топливо (в том числе и авиационное), как уже отмечалось выше, состоит из ряда компонентов, в частности в его химический состав входит декан. Результаты исследований показывают, что после воздействия на декан переменного электрического поля (при перекачке топлива из заправочной емкости в течение 30 - 40 минут в дополнительную емкость при электрическом напряжении на коаксиальных электродах 300 В) концентрация декана в дополнительной емкости уменьшается почти вдвое. Через сутки после прекращения действия поля концентрация декана в дополнительной емкости уменьшается еще почти вдвое. Под воздействием переменного электрического поля и после его воздействия декан может дать три дочерних продукта: тетрагидрометилфуран, метилпентан и изометилпентан, которые также подвергаются деструкции, продуктами которой при сохранении атомарного состава, должны быть этилен C_2H_4 и пропилен C_3H_6 . Продукты с углеродным скелетом $C_2 - C_6$, обладают большей теплотой сгорания, чем исходная молекула декана с углеродным скелетом C_{10} . При деструкции молекулы декана $C_{10}H_{22}$ с образованием двух молекул тетрагидрометилфурана C_5H_{10} должны образовываться два свободных атома водорода. Свободный водород может возникнуть так же при деструкции метилпентана и изометилпентана. Образование свободного водорода и перенос его вместе с жидким топливом в камеру сгорания ускоряет химическую реакцию окисления. Она протекает быстрее и полнее, так как наличие активных центров в виде атомарного водорода в зоне горения уменьшает среднее значение энергии активации. Высокая реакционная способность атомарного водорода приводит к тому, что эти центры определяют механизм реакции окисления и ее скорость.

Механизмом возникновения активных частиц под действием переменного электрического поля является возбуждение колебательных уровней молекул. При возбуждении колебательных уровней $C - C$ и $C - H$ связи в молекуле не разрываются, но возбужденная молекула становится активной частицей с

повышенной реакционной способностью и длительным (исчисляемым часами) временем существования в возбужденном состоянии. Такое время существования активной частицы может объяснить длительность деструкции молекул декана после прекращения действия электрического поля.

При молекулярной модификации углеводородного топлива скорость образования радикалов определяется напряженностью и частотой электрического поля. Напряженность поля определяет концентрацию активных частиц, возникающих при каждом импульсе, а частота определяет скорость генерации активных частиц.

Поскольку углеводородное топливо является многокомпонентной химической средой, содержащей примеси, то его можно рассматривать как слабый полярный диэлектрик.

При переменном напряжении диэлектрические потери возникают под действием, как тока сквозной проводимости, так и релаксационных видов поляризации и процессов возбуждения полем вращательных и колебательных энергетических уровней молекул углеводородного топлива. Максимальному тангенсу угла диэлектрических потерь $tg \delta$ будет соответствовать круговая частота переменного напряжения на электродах, обратная времени релаксации возбужденных электрическим полем молекул в топливе. При этом $tg \delta$ имеет значения $\sim 10^{-3}—10^{-2}$ и более.

Следовательно, таким образом обработанное в электрическом поле топливо (при его перекачке из заправочной емкости в дополнительную емкость) сохраняет свои повышенные активные свойства в течение нескольких (пяти – шести) часов, хотя эти свойства и уменьшаются с течением времени.

Время в полете, например, боевого самолета, как правило, значительно меньше 5-6 часов. Поэтому этого времени сохранения повышенной активности топлива достаточно, чтобы при перекачке электрически обработанного топлива из дополнительной емкости в топливный бак боевого самолета непосредственно перед вылетом повысить эффективность сгорания топлива в его штатной системе, не вводя в нее никаких дополнительных конструктивных элементов.

При реализации предложенного метода применительно к конкретному боевому самолету повышение эффективности сгорания топлива достигается только тем, что в топливный бак самолета топливо перед вылетом поступает из дополнительной емкости с электрически обработанным топливом. При этом никаких конструктивных и технологических изменений в системах самолета не требуется, но выполняется основополагающий критерий при разработке боевого самолета – «быстрее догнать и быстрее удрать».

В свою очередь, характерными особенностями и преимуществами предлагаемого метода при выполнении операции перекачки топлива из заправочной емкости в дополнительную емкость в электрическом поле являются:

- использование вместо высоковольтного постоянного напряжения (прототип) низковольтного переменного электрического напряжения на электродах, что позволяет увеличить эффективность сгорания топлива (см. выше) с одновременным упрощением конструкции устройств, реализующих предлагаемый способ при выполнении данной операции перекачки топлива из заправочной емкости в дополнительную емкость;

- в разработанном методе [18] создают переменное относительно слабое электрическое поле в поперечном направлении к потоку углеводородного топлива, тогда как в известных (см. выше) создают продольное к потоку топлива постоянное сильное электрическое поле, что усложняет конструкцию реализующих известный способ устройств и увеличивает гидравлическое сопротивление электродной системы потоку топлива;

- в разработанном методе [18], как и в методе [17], информативным параметром оптимальности процессов сгорания углеводородного топлива является параметр, который можно измерить существующими приборами, а именно – максимальный для выбранного (заданного) вида углеродного топлива тангенс угла диэлектрических потерь $tg \delta$.

Данная величина $tg \delta$ соответствует определенной частоте напряжения на электродах, что дает возможность выбрать оптимальную частоту напряжения на

электродах, равную максимальному значению $tg \delta$. Это принципиально невозможно реализовать в известных методах, в том числе и в прототипе.

Результаты исследований содержания $C_{\delta} = \frac{C_{\delta \text{ тек}}}{C_{\delta \text{ по}}} \cdot 100, \%$ декана в обработанном в течение 30 - 40 минут в поперечном переменном электрическом поле топливе при электрическом напряжении на коаксиальных электродах 300 В при перекачке топлива из заправочной емкости в дополнительную емкость приведены в таблице 3.3.

Здесь $C_{\text{тек}}$ - текущее содержание декана в предварительно обработанном в переменном электрическом поле топливе; $C_{\text{до}}$ - содержание декана в топливе непосредственно после обработки в электрическом топливе при перекачке топлива из заправочной емкости в дополнительную емкость.

Таблица 3.3 – Последствие воздействия лектрического поля на топливо

Содержание декана в обработанном в электрическом поле топливе при перекачке топлива из заправочной емкости в дополнительную емкость, $C_{\delta} = \frac{C_{\delta \text{ тек}}}{C_{\delta \text{ по}}} \cdot 100, \%$		
Непосредственно после обработки в электрическом поле	Через 24 часа после обработки в электрическом поле	Через 48 часов после обработки в электрическом поле
100	48	23,5

Таким образом, экспериментально подтверждено последствие воздействия электрического поля на топливо при приложении к потоку топлива поперечного переменного электрического поля с изменяющейся частотой.

3.3.1.3 Метод повышения эффективности распыла топлива в форсуночных модулях с использованием резко неоднородных электрических полей в топливной форсунке

Разработаны (обладающие патентной чистотой) принципы построения форсуночных модулей с улучшенными качественными показателями распыла и сгорания топлива, когда ЭУВТ является конструктивным элементом (ее электродная часть) топливной пневматической форсунки.

Известны различные способы повышения эффективности распыла топлива путём создания в топливе электрического поля и использования различных операций при подготовке топливно-воздушной смеси, рассмотренные в п. 3.3.1.1 настоящего раздела.

Наиболее близким к разработанному методу и принятым в качестве прототипа является метод повышения эффективности распыла углеводородного топлива [патент РФ № 2469205, МПК F02M 27/04], по которому уменьшают размеры капель топлива при его распылении из форсунки путем создания в потоке топлива перед форсункой между электродами типа «сетка-сетка» продольного к потоку топлива постоянного электрического поля с высокой напряженностью 800 – 1500 В/мм $((8 - 15) \cdot 10^5 \text{ В/м})$. Далее по данному методу получают подачей воздуха топливно-воздушную смесь и обеспечивают ее горение. При этом на электроды подают постоянное высоковольтное напряжение. В качестве топлива в прототипе применяли при экспериментах дизельное топливо и бензин, смешанный с 20 % этилового спирта.

Недостатками данного известного метода повышения эффективности распыла топлива являются:

- невысокое качество распыла;
- использование очень сильных электрических полей;
- он требует высокой очистки топлива для исключения засорений сеток-электродов;
- использование вместо стандартного топлива специально приготовленного бензина, смешанного с 20 % этилового спирта;
- конструктивная и технологическая сложность устройств, его реализующих, требующая существенных конструктивных изменений в существующих топливных системах авиадвигателей.

Технической задачей, на решение которой направлен разработанный метод [16], является улучшение параметров каплеобразования на выходе топливной форсунки, что в конечном итоге приведет к более полному ее сгоранию и к снижению уровня токсичности выходных продуктов горения, повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности авиадвигателя.

Указанный технический результат достигается тем, что создают в потоке топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой однородное электрическое поле и резко неоднородное электрическое поле на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха. При этом одновременно создают как однородное так и резко неоднородное электрическое поле. Причем создают в резко неоднородном электрическом поле в закрученных топливной пленке и потоке воздуха униполярный электрический заряд одного знака. Кроме того, однородное в потоке топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой и резко неоднородное электрическое поле на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха создают или/и постоянным, или/и переменным с изменяющейся частотой. Далее осуществляют двухсторонний обдув закрученными потоками воздуха разбивающейся на капли вытекающей из сопла закрученной топливной пленки.

В основу предлагаемого метода [16] положены следующие физико-технические и физико-химические явления.

Известно, что распыливание топлива играет важную роль в эффективности сгорания топливно-воздушной смеси и количестве испускания при сгорании загрязняющих веществ. В частности, более мелкодисперсная топливно-воздушная смесь обеспечивает более эффективное сгорание топлива, приводящее к увеличению отдаваемой двигателем мощности и уменьшению вредных выбросов. Это связано с тем фактом, что сгорание начинается от поверхности раздела между каплями топлива и воздухом (кислородом). Если размер капель топлива уменьшается, полная площадь поверхности до начала процесса горения увеличивается, повышая эффективность сгорания топливно-воздушной смеси и

улучшая качественные характеристики выбросов продуктов сгорания (улучшая экологические показатели работы авиадвигателей).

В разработанном методе [16] уменьшение размера капель на выходе форсунки достигается тем, что одновременно в однородном переменном электрическом поле с изменяющейся частотой при относительно малых (до 1 кВ) напряжениях на электродах осуществляют в форсунке непосредственно перед его закруткой молекулярную модификацию топлива путем возбуждения вращательных и колебательных энергетических уровней молекул углеводородного топлива. А в резко неоднородном электрическом поле на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха создают униполярный поток ионов и сообщают униполярный заряд того или иного знака как каплям разбивающейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки, так и обдуваемому потоку воздуха. При этом знак электрического заряда, как на каплях, так и в потоке обдуваемого воздуха выбирают один и тот же.

В главе 2 настоящей диссертации показано, что униполярный электрический заряд капли углеводородного топлива уменьшает ее поверхностное натяжение (см. выражение (2.15) и рисунки 2.5 – 2.8).

Следовательно, имеет место уменьшение поверхностного натяжения заряженной капли горючего по сравнению с незаряженной каплей, что способствует ее разрушению под действием аэродинамических сил. Образуются более мелкие капли. Известно, что чем меньше диаметр капли горючего и чем однородней состав горючей смеси, тем эффективнее процесс воспламенения и горения углеводородных топлив и их смесей.

В результате осуществляют уменьшение поверхностного натяжения заряженных капель модифицированного в однородном электрическом поле углеводородного топлива и одновременно создают интенсивную турбулизацию среды вокруг капель топлива за счет аэрогидродинамических и кулоновских сил отталкивания (электрические заряды капель топлива и обдуваемого воздушного потока одного знака).

Теоретические основы получения униполярного потока ионов в потоке воздуха в резко неоднородном поле при коронном разряде подробно изложены в п. 2.3 второй главы диссертации.

Как следствие, исходные капли топлива разбившейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки дробятся на более мелкие одноименно заряженные капли в двухсторонних предварительно закрученных потоках обдуваемого воздуха, что обеспечивает получение мелкодисперсной топливно-воздушной смеси.

Кроме того, заряженная закрученная пленка топлива легче разбивается на капли в потоке воздуха. Последнее обстоятельство приводит к тому, что при необходимости можно уменьшить скорости обдуваемого пленку воздуха для получения требуемых размеров капель топлива.

Поскольку получаемые по разработанному методу [16] более мелкие капли имеют электрический заряд одного знака, исключается возможность их слияния в полете. Таким образом, обеспечивается не только уменьшение размера капель топлива, но и увеличиваются интенсивность распыливания топлива и равномерность распределения капель топлива в создаваемой топливно-воздушной смеси.

Механизм модификации топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой в переменном однородном электрическом поле аналогичен вышерассмотренному.

Таким образом, теоретически и экспериментально подтверждено повышение эффективности распыла углеводородного топлива и, как следствие, увеличение эффективности сгорания топливно-воздушной смеси одновременным созданием в потоке топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой однородного электрического поля и резко неоднородного электрического поля на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха. В резко неоднородном электрическом поле создают униполярный поток ионов и сообщают униполярный заряд того или иного знака как каплям разбивающейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки, так и обдуваемому потоку

воздуха. При этом создают в закрученной топливной плёнке и потоке воздуха униполярный электрический заряд одного знака.

В заключение отметим, что на все разработанные электрокаплеструйные методы построения форсуночных модулей с улучшенными качественными показателями распыла и сгорания топлива в авиационных двигателях защищены патентами Российской Федерации [16-18]. На базе разработанных методов на дальнейших этапах выполнения проекта предполагается разработаны конструкции, изготовлены и экспериментально испытаны форсуночные модули.

3.4 Разработка методов конструирования электрокаплеструйных электропневматических форсунок газотурбинных авиадвигателей с использованием резко неоднородных электрических полей

Разработаны принципиально новые подходы по конструктивной реализации электропневматических форсунок. Данные электропневматические форсунки разработаны в соответствии с созданными методами повышения эффективности процессов распыла углеводородного топлива с использованием резко неоднородных электрических полей непосредственно в самой топливной форсунке. Мировая новизна предлагаемых конструктивных решений электропневматических форсунок для газотурбинных авиационных двигателей подтверждена полученными автором патентами Российской Федерации [20-22].

Разработана также новые технологии конструктивной реализации резко неоднородного поля в ЭПФ, обработки и изготовления изолирующих деталей между электродами ЭПФ из сверх твердых и жаропрочных керамических материалов. имеющие самостоятельное значение для различных отраслей промышленности.

3.4.1 Конструктивная реализация электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного

электрического поля с использованием внутреннего воздушного завихрителя

Впервые разработанная принципиально новая электропневматическая форсунка [20] реализует ранее рассмотренный метод [16] повышения эффективности процессов распыла топлива. На ее примере иллюстрируются новые подходы к конструированию электродной системы ЭУВТ внутри форсунки.

Известны топливные форсунки, в которых для повышения эффективности распыла топлива создают в коаксиальных внутренних и наружных каналах закрученные в противоположном направлении потоки топлива и воздуха [патент РФ № 2172893, МПК F23D11/12, F23C11/00, B05B1/34, опубликовано 27.08.2001], недостатком известного устройства является невысокое качество распыла топлива.

Известна так же топливная форсунка газотурбинного двигателя, содержащая корпус, внутреннюю и наружную втулки, образующие с корпусом коаксиальные каналы для создания параллельных потоков жидкости в среднем канале и потоков распылителя во внутреннем и наружном каналах, подключенных к сопловому аппарату, позволяющему интенсифицировать горение жидкого топлива путём максимального развития поверхности жидкой фазы, что достигается переходом к сжиганию топлива в капельном состоянии. Известна пневматическая топливная форсунка, содержащая топливный и воздушные внутренний и наружный завихрители для закрутки потоков топлива и воздуха [патент РФ № 2431777, кл. F23D11/12, опубликовано БИ №29, 20.10.2011], недостатком известного устройства является невысокое качество распыла топлива.

Известны различные устройства и способы повышения эффективности распыла топлива путём создания в топливе электрического поля и использования различных операций при подготовке топливно-воздушной смеси. По одному из них в дизельном двигателе внутреннего сгорания дизельное топливо дополнительно подвергают обработке электрическим полем в камере, в которой испарившийся пар диссоциирует на водород и кислород, поступающие в цилиндры в смеси с топливом [патент РФ № 2011881, МПК F02М 27/04, БИ №8, 1994]. Недостатками известного устройства являются невысокое качество распыла, многооперационность и конструктивная сложность устройств, его реализующих.

Наиболее близким к разработанной конструкции ЭПФ [20] и принятым в качестве прототипа является топливная форсунка [патент РФ № 2469205, МПК F02М 27/04] в которой в топливном канале размещены электроды типа «сетка-сетка», на которые подают постоянное электрическое напряжение и создают между электродами электрическое поле с высокой напряженностью $(8 - 15) \cdot 10^5$ В/м. Далее подачей закрученного потока воздуха получают топливно-воздушную смесь, и обеспечивают её горение, при этом на электроды подают постоянное высоковольтное напряжение. В качестве топлива в прототипе применяли при экспериментах дизельное топливо и бензин, смешанный с 20 % этилового спирта. Кроме указанных выше конструктивных элементов, данная топливная форсунка содержит корпус, распыливающее сопло, топливные и воздушные внутренние завихрители, конфузор.

К недостаткам данного известного устройства относится невысокое качество распыла, использование очень сильных электрических полей, оно требует высокой очистки топлива для исключения засорений сеток-электродов, использование вместо стандартного топлива специально приготовленного - бензина, смешанного с 20 % этилового спирта, а также конструктивная и технологическая сложность устройства, требующая существенных конструктивных изменений в существующих топливных системах газотурбинных двигателей.

Технической задачей разработки новой электропневматической форсунки является улучшение параметров каплеобразования на ее выходе, получение мелкодисперсной топливно-воздушной смеси. Это в конечном итоге приведет к более полному сгоранию смеси, а также снижению уровня токсичности выходных продуктов горения и повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности авиадвигателя.

Указанный технический результат в разработанной ЭПФ [20] достигается тем, что одним из электродов, соединенным с потенциальным выходом источника электрического напряжения, является металлический внутренний воздушный завихритель и соединённая проводящей перемычкой металлическая плёнка на внутренней и внешней поверхности конфузора изолирующей втулки, одновременно образующие внутренний воздушный канал, при этом металлическая плёнка на наружной поверхности конфузора изолирующей втулки является одновременно одной из стенок топливного канала с закрученным потоком топлива и распыливающим соплом, другая стенка которого образует конфузорный участок распыливающего сопла и одновременно является вместе с металлическим корпусом и наружным воздушным завихрителем с соплом вторым электродом топливной форсунки, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения. Для увеличения устойчивости процесса горения топливно-воздушной смеси закрутка потоков топлива и воздуха в топливном и воздушных завихрителях осуществляется в одном направлении. При этом, в качестве металла плёнки на поверхности конфузора изолирующей втулки использован тугоплавкий металл, например, вольфрам, титан, а толщина плёнки составляет 1-5 мкм. Металлическая плёнка на внутренней и внешней поверхности конфузора изолирующей втулки заканчивается на торце конфузора со стороны распыливающего сопла, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм, при чём в качестве материала изолирующей втулки выбрана керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика Al₂O₃- 95 %, ZrO₂ - 5 %.

Конструкция предлагаемой топливной форсунки представлена на рисунке 3.2.

На рисунке 3.2 приняты следующие обозначения:

1 - трубка подвода топлива; 2 – керамическая шайба; 3 – внутренний воздушный завихритель; 4 – воздушный внутренний канал; 5 - проводящий стержень; 6 – изоляционная керамическая трубка; 7 – входной электрод; 8 – корпус форсунки; 9 – топливный канал; 10 – топливный завихритель; 11 – воздушный наружный завихритель; 12 – металлическая плёнка на наружной поверхности конфузора изолирующей втулки; 13 – металлическая плёнка на внутренней поверхности конфузора изолирующей втулки; 14 – распыливающее сопло; 15 – проводящая перемычка; 16 – канал воздушного наружного завихрителя; 17 – изолирующая втулка; 18 – источник электрического напряжения.

Принцип действия разработанной электропневматической топливной форсунки основан на распыливании заданного объема топлива с использованием рассмотренных выше электрофизических и электрогазодинамических эффектов (модификации топлива, уменьшение коэффициента поверхностного натяжения униполярно заряженных капель топлива, исключение слияния униполярно заряженных капель в топливовоздушной смеси и других) в соответствующим образом организованных электрических полях от источника электрического напряжения 18, а также энергии воздушного потока.

поле, которое прикладывается к закрученным потокам топлива и воздуха между кольцевыми коаксиальными электродами типа «игла» 12, 13 (с радиусами закругления, меньшим половины толщины нанесенной на внутреннюю и внешнюю поверхности конфузора изолирующей втулки 17, то есть меньшим 0,5 – 2,5 мкм) и распыливающим соплом 14. Все это позволяет увеличить, по сравнению с прототипом, эффективность параметров распыла топлива и горения топливовоздушной смеси в газотурбинных двигателях. Кроме того, использование энергии воздушного потока позволяет снизить перепад давления топлива на форсунке, что, в свою очередь, способствует повышению ресурса как

самой электропневматической форсунки, так и топливного насоса (на рисунке 3.2 не показанного). При этом используется энергия высокоскоростного закрученного с помощью внутреннего *4* и наружного *11* воздушных завихрителей воздушного потока, поступающего из компрессора (на фиг.1 не показанного).

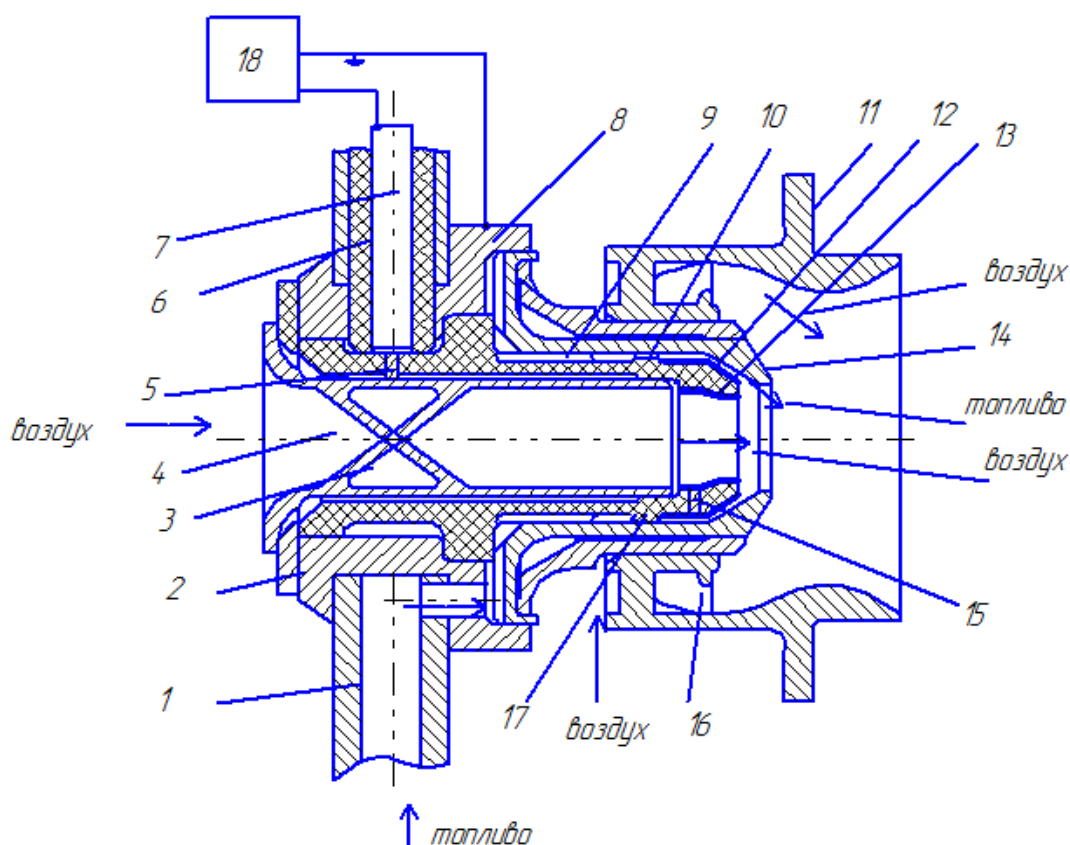


Рисунок 3.2 – Разработанная принципиально новая патентозащищенная [20] электропневматическая форсунка с конструктивной реализацией резко неоднородного электрического поля с использованием внутреннего воздушного завихрителя и напыленной пленки из тугоплавкового металла

Однородное электрическое поле воздействует на закрученный поток топлива после топливного завихрителя *10*. Для создания униполярного потока ионов знака потенциала игольчатого электрода используется резко неоднородное

Таким образом, на выходе данной электропневматической топливной форсунки образуется гомогенизированная топливно-воздушная смесь, что также снижает уровень дымления в выхлопных газах газотурбинного двигателя.

Для распыливания заданного объема топлива, необходимо, чтобы поток топлива в топливном канале был преобразован в кольцевую пленку в распыливающем сопле 14. Для этого топливо в форсунку поступает через топливную трубку 1 и отверстие в корпусе 8 и далее попадает в кольцевой топливный канал 9 и проходит через винтовые каналы топливного завихрителя 10. После прохождения шнековых каналов топливного завихрителя 10 закрученный поток топлива под действием центробежных сил распределяется по внутренней поверхности канала распыливающего сопла - «префилмера» 14 в виде закрученной пленки и попадает на распыливающую кромку сопла, где встречается с потоком воздуха из внутреннего центрального воздушного канала 4. Данный канал образован внутренним каналом воздушного внутреннего металлического завихрителя 3 и электродом 13. Электрод 13 выполнен в виде напыленной тонкой пленки из тугоплавкого металла, например, вольфрама, титана, толщиной (1-5) мкм на внутренней поверхности конфузора изолирующей втулки 17 из керамики. При этом, керамика выбрана из условий выполнения требований как по обеспечению необходимых изолирующих свойств, так и жаропрочности. Исходя из этих условий, в предлагаемой топливной форсунке использована керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика типа Al_2O_3 - 95 %, ZrO_2 - 5 %. Торцевой внутренней поверхности воздушного завихрителя 3 касается напыленная металлическая пленка 13, образуя электрический контакт. Таким образом реализуется потенциальный электрод топливной форсунки, который через проводящий стержень 5, электрически контактирующий с металлическим корпусом внутреннего воздушного завихрителя 3, и входной электрод 7, подсоединяется к потенциальному выходу источника электрического напряжения 18. Входной

электрод 7 отделен от корпуса 8 форсунки изоляционной керамической трубкой 6

Внутренний (центральный) воздушный канал форсунки представляет собой канал 4, образованный внутренним воздушным завихрителем 3 например, осевым двухлопаточным завихрителем с плоскими лопатками с заданным углом закрутки, который далее переходит в конфузорный канал изолирующей втулки 17. Закрученный воздух после прохождения внутреннего (центрального) воздушного канала затем воздействует на закрученную топливную пленку. При этом закрутка топлива и воздуха осуществляется в одну и ту же сторону, что обеспечивает устойчивость процесса горения на некоторых режимах работы камеры сгорания турбореактивного двигателя.

При подаче электрического напряжения от источника 18 на электроды разработанной электропневматической топливной форсунки между электродами 12, 13 типа «острие» и распыливающим металлическим соплом 14 возникает резко неоднородное электрическое поле и образуется униполярный поток ионов знака потенциала игольчатых электродов 12, 13. При этом закрученной топливной пленке и закрученному потоку воздуха сообщается униполярный электрический заряд. Сообщается также униполярный заряд и каплям топлива при распаде заряженной топливной пленки. Кроме того, при проходе закрученного потока топлива после топливного завихрителя 10 топливо модифицируется в однородном электрическом поле. Модификация топлива повышает эффективность сгорания топлива.

После срыва с кромки распыливающего сопла 14 топливновоздушная пленка по периферии обдувается закрученным потоком воздуха из наружного осевого воздушного завихрителя 11. Омывающий границу раздела сред воздух имеет значительную скорость (80...100 м/с), возмущая и дестабилизируя ниже по потоку межфазную границу с образованием крупномасштабных связанных заряженных униполярно структур – «лигаментов». Заряженные униполярно лигаменты дробятся на более мелкие капли за счет кулоновских сил отталкивания и высоким уровнем турбулентных напряжений в сдвиговом слое,

индуцированном закруткой потоков воздуха с наружной и внутренней стороны, которые затем поступают в основную зону горения камеры сгорания газотурбинного двигателя

Следовательно, в отличие от прототипа, в разработанной электропневматической топливной форсунке [20] для увеличения эффективности распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси одним из электродов, соединенным с потенциальным выходом источника электрического напряжения 18, является металлический внутренний воздушный завихритель 3 и соединённая проводящей перемычкой 15 металлическая плёнка 13, 12 на внутренней и внешней поверхности конфузора изолирующей керамической втулки 17, одновременно образующие внутренний воздушный канал 4. При этом металлическая плёнка 12 на наружной поверхности конфузора изолирующей втулки является 17 одновременно одной из стенок топливного канала с закрученным завихрителем 10 потоком топлива и распыливающим соплом 14. Другая стенка топливного канала образует конфузорный участок распыливающего металлического сопла 14. Она одновременно является вместе с металлическими корпусом 8, наружным воздушным завихрителем 11 с соплом - вторым электродом топливной форсунки, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения 18.

Таким образом, (по сравнению с прототипом):

- существенно уменьшается гидравлическое сопротивление электродной системы потоку топлива и воздуха;
- увеличивается надёжность работы топливной электропневматической форсунки, поскольку исключается засорение электродной системы;
- упрощается конструкция электропневматической топливной форсунки за счет использования в качестве электродов штатных необходимых функциональных элементов (завихрителей, распыливающего сопла и других);
- повышается эффективность распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси специальным образом организованных электрических полей.

По своему функциональному назначению, как уже отмечалось выше, разработанное устройство [20] является электропневматической форсункой. В ней для увеличения эффективности процессов распыла топлива, образования и горения топливно-воздушной смеси создают в топливном канале после топливного завихрителя в закрученном потоке топлива однородное электрическое поле и резко неоднородное электрическое поле на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха. При этом однородное и резко неоднородное электрическое поле создают одновременно, причем создают в резко неоднородном электрическом поле в закрученных топливной пленке и потоке воздуха униполярный электрический заряд одного знака. Каплям топлива при распаде топливной пленки сообщается униполярный электрический заряд. Последнее способствует более интенсивному распаду униполярно заряженной вытекающей из распыливающего сопла топливной плёнки на более мелкие капли в закрученном потоке воздуха и препятствует их слиянию за счет кулоновских сил в образующейся топливно-воздушной смеси. В свою очередь, сообщение униполярного заряда закрученному потоку воздуха того же знака, что и каплям топлива, способствует (за счет кулоновских сил) более интенсивному перемешиванию топливно-воздушной смеси.

Электрический заряд каплей топлива снижает их поверхностное натяжение (см. выражение (2.14) и полученное выражение (2.19)), что облегчает распад заряженной капли на более мелкие капли, интенсифицирует испарение заряженной капли при попадании капли в жаровую трубу.

Все эти обстоятельства способствуют интенсификации процессов распыла и горения топливно-воздушной смеси в турбореактивном двигателе, снижают тепловое излучение и, соответственно, снижают лучистый тепловой поток, негативно воздействующий на стенки жаровой трубы.

Кроме того, однородное в потоке топлива в форсунке после топливного завихрителя и резко неоднородное электрическое поле на выходе из распыливающего сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха создают или/и постоянным, или/и переменным с изменяющейся

частотой. Далее осуществляется двухсторонний обдув (с использованием внутреннего и наружного воздушных завихрителей) закрученными потоками воздуха разбивающейся на капли вытекающей из распыливающего сопла закрученной топливной пленки.

Разработанная электропневматическая топливная форсунка [20] прежде всего предназначена для камер сгорания богато-бедного типа газотурбинных авиационных двигателей, в которой обдув заряженной топливной плёнки с распыливающего сопла воздухом осуществляется с внутренней и внешней стороны с использованием внутреннего и наружного воздушных завихрителей. В этом случае турбулентные пульсации, возникающие как за счёт газогидродинамических явлений, так и электрогазодинамических явлений, активно участвуют в процессе распада топливной плёнки, вытекающей из распыливающего сопла. Для вовлечения сил инерции в процесс дробления капель топлива и воздух, как отмечалось выше, предварительно закручивают. Противоположная закрутка воздуха, проходящего через внутренний и наружный завихрители, позволяют максимально интенсифицировать процесс распада топливной плёнки и дальнейшее дробление капель. Однако при этом противоположная закрутка, как правило, приводит к более значительным нестационарным эффектам. Это негативно сказывается на устойчивости процесса горения на некоторых режимах работы камеры сгорания турбореактивного двигателя.

В связи с этим, в [20] используется закрутка потоков в одном направлении для повышения устойчивости процесса горения в газотурбинном двигателе.

В основу разработанной электропневматической топливной форсунки положены рассмотренные выше физико-технические и физико-химические явления. Применительно к конструкции ЭПФ остановимся более подробно на некоторых из них.

Известно, что распыливание топлива играет важную роль в эффективности сгорания топливно-воздушной смеси и количестве испускания при сгорании загрязняющих веществ. В частности, более мелкодисперсная топливно-воздушная

смесь обеспечивает более эффективное сгорание топлива, приводящее к увеличению отдаваемой двигателем мощности и уменьшению вредных выбросов. Это связано с тем фактом, что сгорание начинается от поверхности раздела между каплями топлива и воздухом (кислородом). Если размер капель топлива уменьшается, полная площадь поверхности до начала процесса горения увеличивается, повышая эффективность сгорания топливно-воздушной смеси и улучшая качественные характеристики выбросов продуктов сгорания (улучшая экологические показатели работы авиадвигателей).

В разработанном устройстве уменьшение размера капель на выходе ЭПФ достигается тем, что в потоке топлива после топливного завихрителя в однородном переменном электрическом поле с изменяющейся частотой при относительно малых (до 4 кВ) напряжениях на электродах осуществляют молекулярную модификацию топлива путем возбуждения вращательных и колебательных энергетических уровней молекул углеводородного топлива, а также осуществляют разбивку больших кластеров соединений различных молекул топлива на более мелкие. В свою очередь, в резко неоднородном электрическом поле на выходе из распыливающего сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха создают униполярный поток ионов. Таким образом сообщают униполярный заряд того или иного знака как каплям разбивающейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки, так и обдуваемому потоку воздуха. При этом знак электрического заряда как на каплях, так и в потоке обдуваемого воздуха выбирают один и тот же. Причем однородное и резко неоднородное электрическое поле создают одновременно.

В результате осуществляют уменьшение поверхностного натяжения заряженных капель модифицированного в однородном электрическом поле углеводородного топлива и одновременно создают интенсивную турбулизацию среды вокруг капель топлива за счет аэрогидродинамических и кулоновских сил отталкивания (электрические заряды капель топлива и обдуваемого воздушного потока одного знака).

Как следствие, исходные капли топлива разбившейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки дробятся на более мелкие одноименно заряженные капли в двухсторонних предварительно закрученных потоках обдуваемого воздуха, что обеспечивает получение мелкодисперсной топливновоздушной смеси.

Кроме того, заряженная закрученная пленка топлива легче разбивается на капли в потоке воздуха. Последнее обстоятельство приводит к тому, что при необходимости можно уменьшить скорости обдуваемого пленку воздуха для получения требуемых размеров капель топлива.

Поскольку получаемые в предлагаемом устройстве более мелкие капли имеют электрический заряд одного знака, исключается возможность их слияния в полете. Таким образом обеспечивается не только уменьшение размера капель топлива, но и увеличиваются интенсивность распыливания топлива и равномерность распределения капель топлива в создаваемой топливновоздушной смеси.

Механизм модификации топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой в переменном однородном электрическом поле и диэлектрических потерь в однородном поле аналогичен вышерассмотренному.

3.4.1.1 Разработка технологии реализации резко неоднородного электрического поля в новых конструктивных решениях электропневматической форсунке газотурбинных авиационных двигателей

В качестве другого варианта нового конструктивно решения реализации электродной системы с использованием внутреннего воздушного завихрителя может являться впервые разработанная электропневматическая форсунка, на которую также получен патент Российской Федерации [21] .

При реализации данной ЭПФ (как и рассмотренной выше ЭПФ) разработана новая технология получения игольчатых электродов с очень малым радиусом закругления (1 -5 мкм). Известные способы получения игольчатых электродов с

такими малыми радиусами закругления (например, травлением исходного проводящего металла в кислотах) трудоемки, дорогостоящие и требуют большого времени.

В качестве прототипа разработанной ЭПФ [21] выбрана, как и при разработке ЭПФ [20], топливная форсунка [патент РФ № 2469205, МПК F02M 27/04] в которой в топливном канале размещены электроды типа «сетка-сетка», на которые подают постоянное электрическое напряжение и создают между электродами электрическое поле с высокой напряженностью $(8 - 15) \cdot 10^5$ В/м. Далее подачей закрученного потока воздуха получают топливно-воздушную смесь, и обеспечивают её горение, при этом на электроды подают постоянное высоковольтное напряжение. В качестве топлива в прототипе применяли при экспериментах дизельное топливо и бензин, смешанный с 20 % этилового спирта. Кроме указанных выше конструктивных элементов, данная топливная форсунка содержит корпус, распыливающее сопло, топливные и воздушные внутренние завихрители, конфузор.

Недостаткам данного устройства подробно изложены в предыдущем параграфе 3.4.1.

Технической задачей разработки новых конструктивных решений электропневматических форсунок является упрощение их конструкции и технологичности изготовления и улучшение параметров каплеобразования на выходе ЭПФ, получение мелкодисперсной топливно-воздушной смеси, что в конечном итоге приведет к более полному ее сгоранию, а также снижению уровня токсичности выходных продуктов горения и повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности авиадвигателя.

Указанный технический результат достигается тем, что в разработанной электропневматической топливной форсунке внутренний воздушный канал образован внутренними поверхностями центрального металлического стержня, размещенного во входном конфузоре внутреннего металлического воздушного завихрителя с острой выходной кромкой, которые вместе металлической пленкой на данной острой кромке и на выходном торце изолирующей втулки в топливном

канале с закрученным потоком топлива одновременно являются одним из электродов, соединенным с потенциальным выходом источника электрического напряжения, а вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения, является внутренняя поверхность распыливающего сопла в топливном канале вместе с металлическими корпусом и наружным воздушным завихрителем.

Таким образом, для получения игольчатого электрода с малым радиусом закругления использован метод напыления тугоплавкого металла на соответствующие детали ЭПФ. Толщина напыляемой металлической пленки в первом приближении определяет эквивалентный диаметр острия. Следовательно, регулируя толщину напыляемой пленки из тугоплавкого металла, можно получить требуемый (заданный) радиус закругления острого электрода. Чем меньше радиус закругления острого электрода, тем больший по величине электрический ток можно получить в ЭПФ и тем больше может быть ЭГД-воздействие на поток углеводородного топлива в форсунке. В свою очередь, электрический ток при этом определяется униполярным потоком ионов в топливе в резко неоднородном поле. Поэтому, при меньшем радиусе закругления острого электрода можно в топливо инжектировать больший по величине электрический заряд.

В качестве металла плёнки на поверхности острой кромки внутреннего воздушного завихрителя и на выходном торце изолирующей втулки использован тугоплавкий металл, например, вольфрам, титан, а толщина плёнки и радиус закругления острой кромки внутреннего воздушного завихрителя составляют 1-5 мкм. Металлическая плёнка на выходном торце изолирующей втулки заканчивается со стороны распыливающего сопла, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм, причём в качестве материала изолирующей втулки выбрана керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика Al₂O₃- 95 %, ZrO₂ - 5 %.

Для увеличения устойчивости процесса горения топливновоздушной смеси закрутка потоков топлива и воздуха в топливном и воздушных завихрителях осуществляется в одном направлении.

Конструкция предлагаемой топливной форсунки представлена на рисунке 3.3 и рисунке 3.4.

На рисунке 3.3 и рисунке 3.4 приняты следующие обозначения:

1 - трубка подвода топлива; *2* – корпус топливной форсунки; *3* – сопло топливного распылителя (распыливающее сопло); *4* – топливный завихритель с тремя тангенциальными пазами *17*; *5* –воздушный наружный завихритель; *6* – металлическая пленка; *7* – изоляционная керамическая втулка; *8* – воздушный внутренний завихритель; *9* – изоляционная керамическая трубка; *10* – крышка; *11* – потенциальный электрод; *12* – металлическая шайба; *13* – гайка; *14* – стойки центрального стержня; *15* – центральный металлический стержень; *16* – источник электрического напряжения; *17* – паз топливного завихрителя; *18* – топливный распылитель.

Воздушный внутренний завихритель *8* выполнен с входным (по направлению потока воздуха) конфузуром и выходной острой кромкой (см. фиг.1), радиус закругления которой составляет 1-5 мкм. Во входном конфузуре внутреннего воздушного завихрителя *8* располагается центральный металлический стержень *15*, механически соединенный посредством четырех стоек *14* с внутренними стенками конфузуратора. При этом обеспечивается хороший электрический контакт стоек *14* с внутренними стенками конфузуратора внутреннего воздушного завихрителя *8* таким образом, чтобы их электрическое сопротивление было одинаковым.

В центральном металлическом стержне *15* выполнена резьба для резьбового присоединения специального металлического электрода *11* посредством гайки *13* и шайбы *12* к потенциальному выходу источника электрического напряжения *16*. Сборка *13*, *12*, *11* с наружной частью центрального стержня *15* размещается в изолирующей трубке (на рисунке 3.3 не

показанной) для обеспечения требований техники безопасности. Внутренний воздушный завихритель 8 выполнен из металла и изолирован от корпуса форсунки 2 с помощью керамической втулки 7 и керамической трубки 9, материал которых выбран из условий обеспечения хороших изоляционных свойств с одновременным выполнением требований обеспечения жаропрочности, поскольку при работе топливной форсунки в авиационном двигателе температура внешней среды может достигать 800 °С. Поэтому в предлагаемой топливной форсунке в качестве материала керамических втулки 7 и трубки 9 выбрана керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика Al₂O₃- 95 %, ZrO₂ - 5 %.

На выходную острую кромку с радиусом закругления 1-5 мкм внутреннего воздушного завихрителя 8, собранного совместно с изоляционной керамической втулкой 7, нанесено проводящая металлическая пленка (проводящее металлическое покрытие) 6 из тугоплавкого металла, например, вольфрама, титана (см. рисунок 3.4) толщиной 1-5 мкм. При этом металлическая плёнка 6 на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 заканчивается со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм,

Таким образом в разработанной электропневматической топливной форсунке потенциальным электродом, соединенным с потенциальным выходом источника электрического напряжения, 16, являются центральный металлический стержень 15, размещенный во входном конфузоре внутреннего металлического воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой, сам внутренний металлический воздушный завихритель 8 с острой выходной кромкой, пленка 6 из тугоплавкого металла на данной острой кромке и на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 в топливном канале с закрученным потоком топлива. При этом пленка 6 заканчивается на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм.

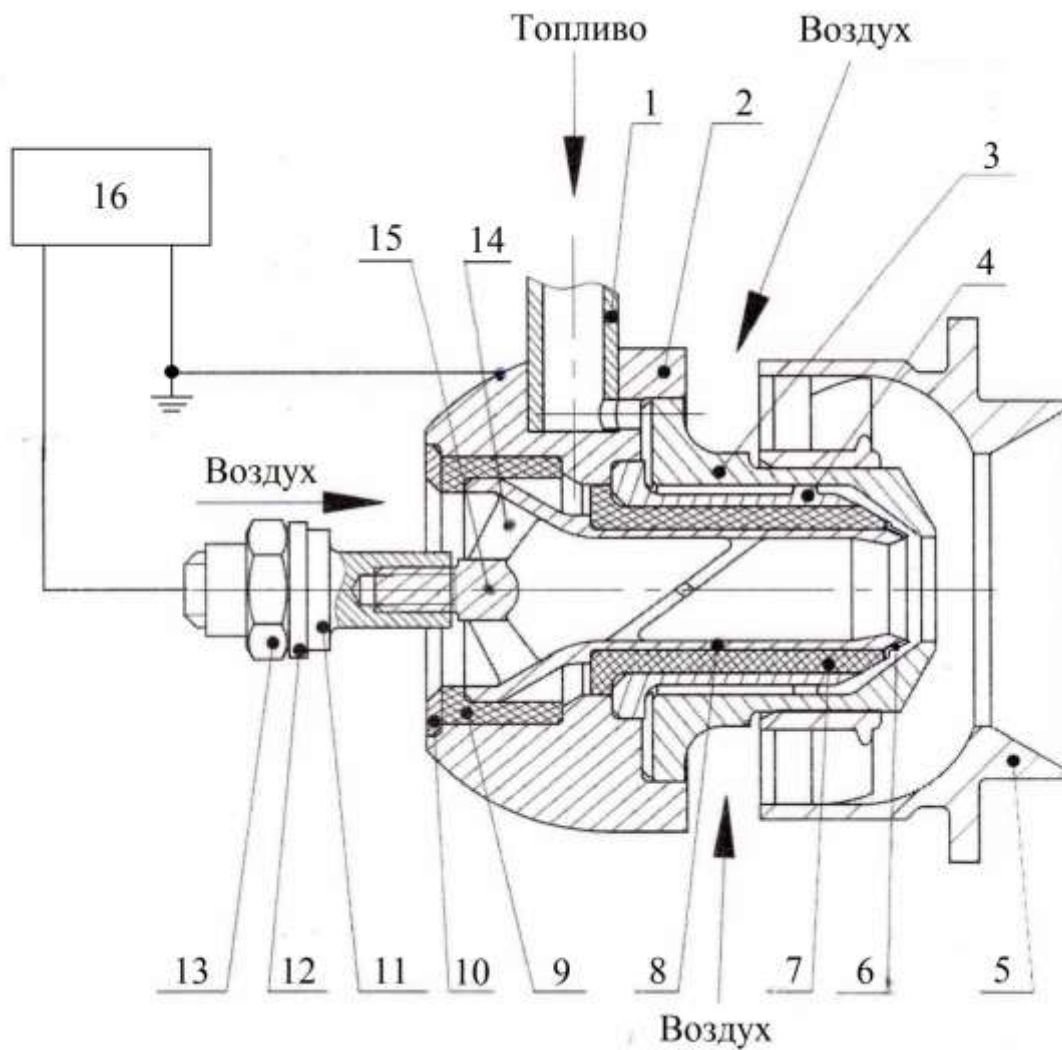


Рисунок 3.3 –Электропневматическая топливная форсунка газотурбинного авиационного двигателя [21] с использованием новой разработанной технологии реализации игольчатых электродов с малыми радиусами закругления острия для создания резко неоднородных электрических полей

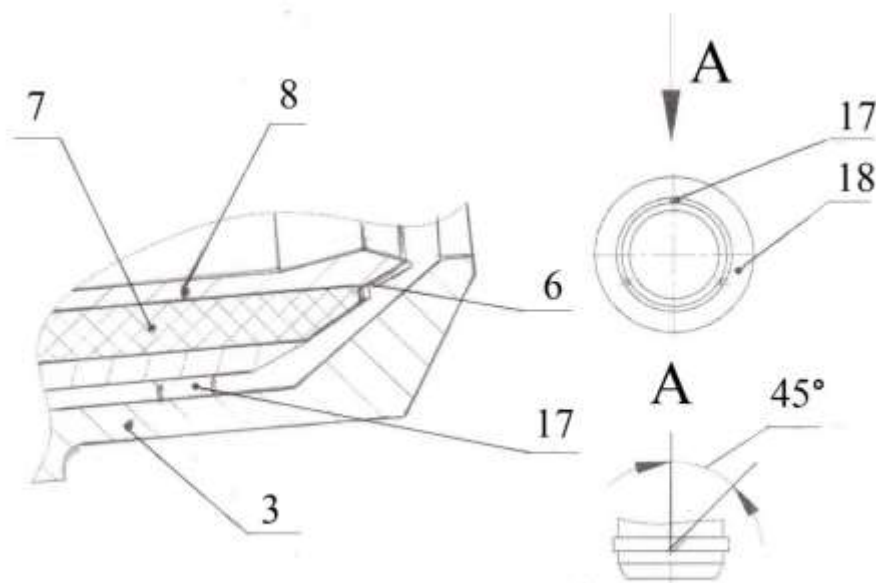


Рисунок 3.4 – К разработке новой технологии реализации игольчатых электродов с малыми радиусами закругления острия для создания резко неоднородных электрических полей в электропневматической форсунке

В свою очередь, внутренний воздушный канал образован внутренними поверхностями центрального металлического стержня 15, размещенного с помощью стоек 14 во входном конфузоре внутреннего металлического воздушного завихрителя 8, внутренние поверхности внутреннего воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой.

Вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения 16, является внутренняя поверхность распыливающего сопла 3 топливного распылителя 18 в топливном канале, металлические корпус 2 и наружный воздушный завихритель 5.

Следовательно, отличительные от прототипа признаки заявленного изобретения состоят в том, что одним из электродов, соединенным с потенциальным выходом источника электрического напряжения 16, являются металлические центральный стержень 15 во внутреннем воздушном канале, внутренний воздушный завихритель 8, выполненный с входным конфузуром и

выходной острой кромкой с радиусом закругления 1-5 мкм, металлическая пленка 6 из тугоплавкого металла на данной острой кромке и на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 в топливном канале с закрученным потоком топлива, одной из стенок которого является внутренняя поверхность распыливающего сопла 3, одновременно являющаяся вместе с металлическими корпусом 2, наружным воздушным завихрителем 5 вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения 16. При этом пленка 6 заканчивается на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм. Закрутка потока топлива в топливном канале осуществляется с помощью топливного завихрителя 4 с тремя тангенциальными пазами 17.

Детали внутреннего воздушного контура форсунки вставляются в корпус 2 и прижимаются крышкой 10. Крышка 10 фиксирует внутреннюю конструкцию форсунки, но данная крышка электрически не контактирует с потенциальным электродом топливной форсунки.

Разработанная конструкция электропневматической топливной форсунки обеспечивает ее конструктивное упрощение и повышение технологичности ее изготовления при одновременном повышении качества распыла топлива за счет уменьшения диаметра распыливаемых капель топлива и сообщении им униполярного электрического заряда. Это обусловлено следующим:

- сообщением закрученным в одном направлении потокам топлива и воздуха униполярного электрического заряда в резко неоднородном поле между электродами типа «игла – плоскость», где роль иглы играют срезы напыленной тугоплавкой металлической пленки на выходном торце изолирующей керамической втулки и острая выходная кромка внутреннего воздушного распылителя, а роль плоскости – внутренняя поверхность распыливающего сопла;
- применением изоляционных керамических деталей простой формы, потому что при этом существенно упрощается их изготовление и уменьшается количество брака, поскольку обработка на современных станках твердых и хрупких керамических заготовок с относительной диэлектрической

проницаемостью 3-15, выдерживающих температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевой керамики Al_2O_3 - 95 %, ZrO_2 - 5 %, является технологически сложной;

- в разработанной конструкции электропневматической топливной форсунки максимально уменьшено число изоляционных керамических деталей (их всего две), при этом, как уже отмечалось выше, сами керамические детали имеют простую форму и сниженные требования к точности изготовления, что улучшает технологичность их изготовления:

- повышением надежности крепления изоляционных керамических деталей к металлу, поскольку в предлагаемой конструкции электропневматической топливной форсунки не требуется применения относительно ненадежной органосиликатной композиции, например, органосиликатной эмали, в качестве клея для крепления керамики к металлу. Разработанная конструкция электропневматической топливной форсунки полностью сварная. Детали внутреннего воздушного контура форсунки вставляются в корпус и прижимаются крышкой, которая в свою очередь приваривается к корпусу. Это повышает надежность и максимально возможную температуру применения электропневматической топливной форсунки;

- применением конструктивно простой системы подвода электрического напряжения от источника электрического напряжения к потенциальному электроду электропневматической топливной форсунки за счет изменения конструкции внутреннего воздушного завихрителя. В конструкцию внутреннего воздушного завихрителя на входе в форсунку введен центральный металлический стержень, на конце которого выполнена резьба. На резьбу в свою очередь устанавливается специальный электрод, к которому подводится электрическое напряжение.

Принцип действия разработанной электропневматической топливной форсунки основан (как и ЭПФ вышерассмотренной) на распыливании заданного объема топлива с использованием электрофизических и электрогазодинамических эффектов (модификации топлива, уменьшение

коэффициента поверхностного натяжения униполярно заряженных капель топлива, исключение слияния униполярно заряженных капель в топливовоздушной смеси и других) в соответствующим образом организованных электрических полях от источника электрического напряжения 16, а также энергии воздушного потока. Игольчатые электроды образованы острой выходной кромкой воздушного внутреннего завихрителя 8 и краями нанесенной на нее и на торец изоляционной керамической втулки 7 металлической пленки 6 из тугоплавкого материала, например, вольфрама или титана (см. рисунки 3.3 и рисунок 3.4).

Для создания униполярного потока ионов знака потенциала игольчатого электрода используется резко неоднородное поле, которое прикладывается к закрученным потокам топлива и воздуха между кольцевыми коаксиальными электродами типа «игла» и выходом распыливающего сопла 3.

Все это позволяет увеличить, по сравнению с прототипом, эффективность параметров распыла топлива и горения топливовоздушной смеси в газотурбинных двигателях. Кроме того, использование энергии воздушного потока позволяет снизить перепад давления топлива на форсунке, что, в свою очередь, способствует повышению ресурса как самой топливной форсунки, так и топливного насоса (на фиг.1 не показанного). При этом используется энергия высокоскоростного закрученного с помощью внутреннего 8 и наружного 5 воздушных завихрителей воздушного потока, поступающего из компрессора (на рисунке 3.3 не показанного).

Таким образом, на выходе данной топливной форсунки образуется гомогенизированная топливовоздушная смесь, что также снижает уровень дымления в выхлопных газах газотурбинного двигателя.

Для распыливания заданного объема топлива, необходимо, чтобы поток топлива в топливном канале был преобразован в кольцевую пленку в распыливающем сопле 3. Для этого топливо в форсунку поступает через топливную трубку 1 и отверстие в корпусе 2 и далее попадает в кольцевой топливный канал и проходит через тангенциальные пазы 17 топливного

завихрителя 4. После прохождения тангенциальных каналов топливного завихрителя 4 закрученный поток топлива под действием центробежных сил распределяется по внутренней поверхности канала распыливающего сопла - «префилмера» 3 в виде закрученной пленки и попадает на распыливающую кромку сопла, где встречается с потоком воздуха из центрального воздушного канала внутреннего воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой. Данный канал образован внутренним каналом воздушного внутреннего металлического завихрителя 8 и его острой кромкой. Игольчатые электроды образованы острой выходной кромкой воздушного внутреннего завихрителя 8 и краями нанесенной на нее и на торец изоляционной керамической втулки 7 металлической пленки 6 из тугоплавкого материала, например, вольфрама или титана, толщиной (1-5) мкм. При этом, керамика выбрана из условий выполнения требований как по обеспечению необходимых изолирующих свойств, так и жаропрочности. Исходя из этих условий, в предлагаемой топливной форсунке использована керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика типа Al_2O_3 - 95 %, ZrO_2 - 5 %. Напыленная металлическая пленка 6 образует электрический контакт между игольчатым электродом внутреннего воздушного завихрителя и игольчатыми электродами на торце изоляционной керамической втулки 7. Таким образом реализуется потенциальный электрод топливной форсунки, который через проводящий центральный стержень 15, электрически контактирующий с металлическим диффузором внутреннего воздушного завихрителя 8, и электрод 11, подсоединяется к потенциальному выходу источника электрического напряжения 16.

Внутренний (центральный) воздушный канал форсунки представляет собой канал, образованный внутренним воздушным завихрителем 8 например, осевым двухлопаточным завихрителем с плоскими лопатками с заданным углом закрутки. Закрученный воздух после прохождения внутреннего (центрального) воздушного канала затем воздействует на закрученную топливную пленку. При

этом закрутка топлива и воздуха осуществляется в одну и ту же сторону, что обеспечивает устойчивость процесса горения на некоторых режимах работы камеры сгорания турбореактивного двигателя.

При подаче электрического напряжения от источника 18 на электроды заявленной топливной форсунки между электродами типа «острие» и распыливающим металлическим соплом 3 возникает резко неоднородное электрическое поле и образуется униполярный поток ионов знака потенциала игольчатых электродов. При этом закрученной топливной пленке и закрученном потоку воздуха сообщается униполярный электрический заряд. Сообщается также униполярный заряд и каплям топлива при распаде заряженной топливной пленки. Кроме того, при проходе потока топлива топливо модифицируется в однородном электрическом поле. Модификация топлива повышает эффективность сгорания топлива.

После срыва с кромки распыливающего сопла 3 топливновоздушная пленка по периферии обдувается закрученным потоком воздуха из наружного осевого воздушного завихрителя 5. Омывающий границу раздела сред воздух имеет значительную скорость (80...100 м/с), возмущая и дестабилизируя ниже по потоку межфазную границу с образованием крупномасштабных связанных заряженных униполярно структур – «лигаментов». Заряженные униполярно лигаменты дробятся на более мелкие капли за счет кулоновских сил отталкивания и высоким уровнем турбулентных напряжений в сдвиговом слое, индуцированном закруткой потоков воздуха с наружной и внутренней стороны, которые затем поступают в основную зону горения камеры сгорания газотурбинного двигателя

Таким образом, (по сравнению с прототипом) дополнительно к вышеуказанным отличиям:

- существенно уменьшается гидравлическое сопротивление электродной системы потоку топлива и воздуха;
- увеличивается надежность работы топливной форсунки, поскольку исключается засорение электродной системы;

- упрощается конструкция и увеличивается технологичность изготовления топливной форсунки;
- повышается эффективность распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси специальным образом организованных электрических полей.

По своему функциональному назначению, как уже отмечалось выше, разработанная ЭПФ является электропневматической форсункой. В ней для увеличения эффективности процессов распыла топлива, образования и горения топливно-воздушной смеси создают в топливном канале после топливного завихрителя в закрученном потоке топлива однородное электрическое поле и резко неоднородное электрическое поле на выходе из сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха. При этом однородное и резко неоднородное электрическое поле создают одновременно, причем создают в резко неоднородном электрическом поле в закрученных топливной пленке и потоке воздуха униполярный электрический заряд одного знака. Каплям топлива при распаде топливной пленки сообщается униполярный электрический заряд. Последнее способствует более интенсивному распаду униполярно заряженной вытекающей из распыливающего сопла топливной пленки на более мелкие капли в закрученном потоке воздуха и препятствует их слиянию за счет кулоновских сил в образующейся топливно-воздушной смеси. В свою очередь, сообщение униполярного заряда закрученному потоку воздуха того же знака, что и каплям топлива, способствует (за счет кулоновских сил) более интенсивному перемешиванию топливно-воздушной смеси.

Электрический заряд каплей топлива снижает их поверхностное натяжение (см. выражение (2.14) и полученное выражение (2.19)), что облегчает распад заряженной капли на более мелкие капли, интенсифицирует испарение заряженной капли при попадании капли в жаровую трубу.

Все эти обстоятельства способствуют интенсификации процессов распыла и горения топливно-воздушной смеси в турбореактивном двигателе, снижают тепловое излучение и, соответственно, снижают лучистый тепловой поток, негативно воздействующий на стенки жаровой трубы.

Предлагаемая электропневматическая топливная форсунка прежде всего предназначена для камер сгорания богато-бедного типа, в которой обдув заряженной топливной плёнки с распыливающего сопла воздухом осуществляется с внутренней и внешней стороны с использованием внутреннего и наружного воздушных завихрителей. В этом случае турбулентные пульсации, возникающие как за счёт газогидродинамических явлений, так и электрогидрогазодинамических явлений, активно участвуют в процессе распада топливной плёнки, вытекающей из распыливающего сопла. Для вовлечения сил инерции в процесс дробления капель топлива и воздух, как отмечалось выше, предварительно закручивают. Противоположная закрутка воздуха, проходящего через внутренний и наружный завихрители, позволяют максимально интенсифицировать процесс распада топливной плёнки и дальнейшее дробление капель. Однако при этом противоположная закрутка, как правило, приводит к более значительным нестационарным эффектам. Это негативно сказывается на устойчивости процесса горения на некоторых режимах работы камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя.

В связи с этим, в предлагаемой ЭПР, как и в предыдущей разработке, используется закрутка потоков в одном направлении для повышения устойчивости процесса горения в газотурбинном двигателе.

В основу предлагаемой топливной форсунки положены следующие физикотехнические и физикохимические явления.

Известно, что распыливание топлива играет важную роль в эффективности сгорания топливно-воздушной смеси и количестве испускания при сгорании загрязняющих веществ. В частности, более мелкодисперсная топливно-воздушная смесь обеспечивает более эффективное сгорание топлива, приводящее к увеличению отдаваемой двигателем мощности и уменьшению вредных выбросов. Это связано с тем фактом, что сгорание начинается от поверхности раздела между каплями топлива и воздухом (кислородом). Если размер капель топлива уменьшается, полная площадь поверхности до начала процесса горения увеличивается, повышая эффективность сгорания топливновоздушной смеси и

улучшая качественные характеристики выбросов продуктов сгорания (улучшая экологические показатели работы авиадвигателей).

В разработанной ЭПФ уменьшение размера капель на выходе топливной форсунки достигается тем, что в потоке топлива после топливного завихрителя в однородном переменном электрическом поле с изменяющейся частотой при относительно малых (до 4 кВ) напряжениях на электродах осуществляют молекулярную модификацию топлива путем возбуждения энергетических уровней молекул углеводородного топлива, а также осуществляют разбивку больших кластеров соединений различных молекул топлива на более мелкие. В свою очередь, в резко неоднородном электрическом поле на выходе из распыливающего сопла закрученной топливной пленки и в закрученном потоке воздуха создают униполярный поток ионов. Таким образом сообщают униполярный заряд того или иного знака как каплям разбивающейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки, так и обдуваемому потоку воздуха. При этом знак электрического заряда как на каплях, так и в потоке обдуваемого воздуха выбирают один и тот же. Причем однородное и резко неоднородное электрическое поле создают одновременно.

В результате осуществляют уменьшение поверхностного натяжения заряженных капель модифицированного в однородном электрическом поле углеводородного топлива и одновременно создают интенсивную турбулизацию среды вокруг капель топлива за счет аэрогидродинамических и кулоновских сил отталкивания (электрические заряды капель топлива и обдуваемого воздушного потока одного знака).

Как следствие, исходные капли топлива разбившейся вытекающей из сопла закрученной топливной пленки дробятся на более мелкие одноименно заряженные капли в двухсторонних предварительно закрученных потоках обдуваемого воздуха, что обеспечивает получение мелкодисперсной топливно-воздушной смеси.

Кроме того, заряженная закрученная пленка топлива легче разбивается на капли в потоке воздуха. Последнее обстоятельство приводит к тому, что при

необходимости можно уменьшить скорости обдуваемого пленку воздуха для получения требуемых размеров капель топлива.

Поскольку получаемые в разработанной ЭПФ более мелкие капли имеют электрический заряд одного знака, исключается возможность их слияния в полете. Таким образом обеспечивается не только уменьшение размера капель топлива, но и увеличиваются интенсивность распыливания топлива и равномерность распределения капель топлива в создаваемой топливно-воздушной смеси.

Механизм модификации топлива в форсунке непосредственно перед его закруткой в переменном однородном электрическом поле состоит в следующем.

Углеводородное топливо (в том числе и авиационное) состоит из ряда компонентов, в частности в его химический состав входит декан. Под воздействием переменного электрического поля и после его воздействия декан может дать три дочерних продукта: тетрагидрометилфуран, метилпентан и изометилпентан, которые также подвергаются деструкции, продуктами которой при сохранении атомарного состава, должны быть этилен C_2H_4 и пропилен C_3H_6 . Продукты с углеродным скелетом $C_2 - C_6$, обладают большей теплотой сгорания, чем исходная молекула декана с углеродным скелетом C_{10} . При деструкции молекулы декана $C_{10}H_{22}$ с образованием двух молекул тетрагидрометилфурана C_5H_{10} должны образовываться два свободных атома водорода. Свободный водород может возникнуть так же при деструкции метилпентана и изометилпентана. Образование свободного водорода и перенос его вместе с жидким топливом в камеру сгорания ускоряет химическую реакцию окисления. Она протекает быстрее и полнее, так как наличие активных центров в виде атомарного водорода в зоне горения уменьшает среднее значение энергии активации. Высокая реакционная способность атомарного водорода приводит к тому, что эти центры определяют механизм реакции окисления и ее скорость.

При молекулярной модификации углеводородного топлива скорость образования радикалов определяется напряженностью и частотой электрического поля. Напряженность поля определяет концентрацию активных частиц,

возникающих при каждом импульсе, а частота определяет скорость генерации активных частиц.

Поскольку углеводородное топливо является многокомпонентной химической средой, содержащей примеси, то его можно рассматривать как слабый полярный диэлектрик.

При переменном напряжении диэлектрические потери возникают под действием как тока сквозной проводимости, так и релаксационных видов поляризации и процессов возбуждения полем энергетических уровней молекул углеводородного топлива. Максимальному тангенсу угла диэлектрических потерь $tg \delta$ будет соответствовать круговая частота переменного напряжения на электродах, обратная времени релаксации возбужденных электрическим полем молекул в топливе. При этом $tg \delta$ имеет значения $\sim 10^{-3}—10^{-2}$ и более.

В свою очередь, поскольку авиационное топливо является многокомпонентной средой с образованием в нем больших кластеров молекул, то переменное электрическое поле с изменяющейся частотой способствует распаду этих кластеров на более мелкие. Это обеспечивает относительно большое время последствия поля на топливо и улучшает процесс каплеобразования.

3.4.1.1.1 Технология реализации резко неоднородного электрического поля в электропневматической форсунке

Резко неоднородное электрическое поле для создания униполярного электрического заряда в разработанных электропневматических форсунках (рисунки 3.2 – 3.4, 3.6, 3.5) реализуется с использованием технологии напыления проводящего покрытия (рисунок 3.5).

В качестве металлического токопроводящего покрытия было использовано жаропрочное из сплава СДП-2 (Ni-Cr-Al-Y). Покрытие наносилось ионно-плазменным напылением на серийном оборудовании – установке МАП-1, разработки ФГУП ВИАМ. Покрытие на керамику осуществлялось впервые.

Толщина напыляемого слоя составила 5...10 мкм. Толщина покрытия определялась на специальном металлическом имитаторе, поскольку замерить толщину покрытия непосредственно на самой детали оказалось проблематично.

Поскольку напыление металлического покрытия на керамику производилось впервые, то в дальнейшем целесообразно произвести специальные исследования

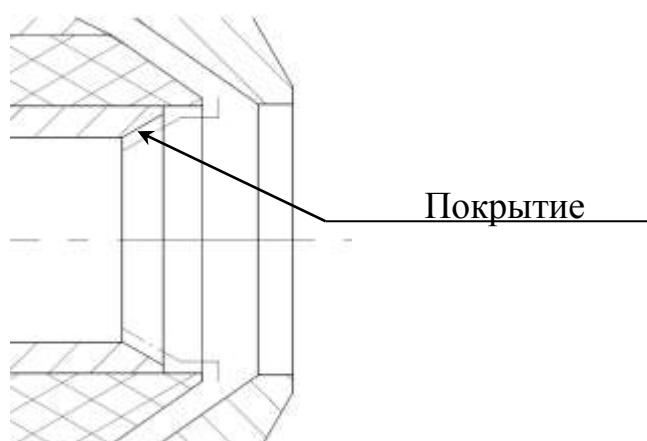


Рисунок 3.5 – К технологии создания резко неоднородного электрического поля в электропневматической форсунке (ЭОФМ)

процесса нанесения покрытия СДП-2 на керамику и провести целый ряд специальных испытаний, причем не таких, как для металлических деталей.

Керамика и металлическая защитная оснастка имеют разные коэффициенты теплового расширения, для чего пришлось допустить покрытие на конической части керамической втулки, что не желательно. Поэтому необходимо было произвести зачистку соответствующей поверхности. Вследствие хрупкости керамики проводить зачистку необходимо очень осторожно. Поэтому в дальнейшем необходимо разработать специальный инструмент и подобрать режимы зачистки для исключения возможных сколов керамики и увод в брак.

3.4.2 Методы обеспечения пожаровзрывобезопасности, электробезопасности и повышения быстродействия электрических устройств воздействия на топливо при конструктивной реализации электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного электрического поля

В первые разработанной электропневматической форсунке газотурбинного авиационного двигателя, на которую также получен патент Российской Федерации [22], защищены на рынке методы обеспечения пожаровзрывобезопасности, электробезопасности для обслуживающего персонала и повышения быстродействия электрических устройств воздействия на топливо при конструктивной реализации электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного электрического поля.

В качестве прототипа разработанной ЭПФ [22] выбрана, как и при разработке ЭПФ [20, 21], топливная форсунка [патент РФ № 2469205, МПК F02M 27/04] в которой в топливном канале размещены электроды типа «сетка-сетка», на которые подают постоянное электрическое напряжение и создают между электродами электрическое поле с высокой напряженностью $(8 - 15) \cdot 10^5$ В/м. Далее подачей закрученного потока воздуха получают топливно-воздушную смесь, и обеспечивают её горение, при этом на электроды подают постоянное высоковольтное напряжение. В качестве топлива в прототипе применяли при экспериментах дизельное топливо и бензин, смешанный с 20 % этилового спирта. Кроме указанных выше конструктивных элементов, данная топливная форсунка содержит корпус, распыливающее сопло, топливные и воздушные внутренние завихрители, конфузор.

К недостаткам данного устройства относится невысокое качество распыла, использование очень сильных электрических полей, низкое быстродействие, низкая электро – и пожаровзрывобезопасность. Другим недостатком Недостаткам прототипа подробно изложены в предыдущих параграфах.

Технической задачей, на решение которой направлена разработка новой электропневматической форсунки для газотурбинных авиационных двигателей, является обеспечение электро – и пожаровзрывобезопасность ЭПФ при ее работе в авиационном двигателе, повышение быстродействия, упрощение конструкции и технологичности изготовления топливной форсунки и улучшение параметров каплеобразования на ее выходе, получение мелкодисперсной топливновоздушной смеси. Все что в конечном итоге приведет к более полному ее сгоранию, а также снижению уровня токсичности выходных продуктов горения и повышению экономичности потребления топлива при обеспечении требуемой мощности авиадвигателя.

Указанный технический результат достигается тем, что в разработанной [22] (на базе [21]) электропневматической топливной форсунке одним из электродов, соединенным через один из резисторов (первый резистор) с потенциальным выходом источника переменного электрического напряжения, является внутренний металлический воздушный завихритель с острой выходной кромкой и входным конфузуром с размещенным центральным металлическим стержнем, металлическая пленка на острой выходной кромке внутреннего воздушного завихрителя и на выходном торце изолирующей втулки в топливном канале с закрученным потоком топлива, а вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника переменного электрического напряжения, является внутренняя поверхность распыливающего сопла в топливном канале вместе с металлическими корпусом и наружным воздушным завихрителем, причем внутренний воздушный канал образован внутренними поверхностями центрального стержня и внутреннего воздушного завихрителя, а выходы источника переменного электрического напряжения соединены через один (первый) и другой (второй) резисторы. При этом переменное электрическое напряжение с выхода источника электрического напряжения осуществляют с изменяющейся частотой следования пачек импульсов с изменением амплитуды напряжения в пачке импульсов.

Для увеличения устойчивости процесса горения топливно-воздушной смеси закрутка потоков топлива и воздуха в топливном и воздушных завихрителях осуществляется в одном направлении. При этом, в качестве металла плёнки на поверхности острой кромки внутреннего воздушного завихрителя и на выходном торце изолирующей втулки использован тугоплавкий металл, например, вольфрам, титан, а толщина плёнки и радиус закругления острой кромки внутреннего воздушного завихрителя составляют 1-5 мкм. Металлическая плёнка на выходном торце изолирующей втулки заканчивается со стороны распыливающего сопла, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм, причём в качестве материала изолирующей втулки выбрана керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика Al₂O₃- 95 %, ZrO₂ – 5 %.

Поскольку электрическое поле в топливной форсунке прикладывается непосредственно к диэлектрическому топливу (керосину), то источник электрического напряжения имеет высокоомную нагрузку (порядка 10⁷ – 10⁸ Ом) и рабочий ток в нем составляет единицы микроампер и ниже. Поэтому выходная мощность используемого в предлагаемом не превышать 1-2 Вт. Следовательно, при использовании таких маломощных высоковольтных схем проблемы безопасности обслуживающего персонала не возникает, поскольку они менее опасны, чем низковольтные (напряжение – десятки вольт и мощность — десятки ватт).

Электрическая схема источника электрического напряжения в разработанной электропневматической топливной форсунке авиационного двигателя [22] **обладает внутренней взрывобезопасностью** с учетом особенностей конструктивного исполнения электропневматической топливной форсунки. Нагрузка источника электрического напряжения в предлагаемой топливной форсунке емкостная, однако емкость электродов типа игла-плоскость очень невелика (пикофарады), что исключает возможность накопления количества электрической энергии, достаточного для создания мощной искры,

вызывающей взрыв. Кроме того для этого в потенциальную цепь источника электрического напряжения последовательно с емкостной нагрузкой электродов включен один из резисторов (первый резистор), что ограничивает электрический ток между электродами. Последнее обосновано тем, что требуемый для работы электропневматической топливной форсунки ток намного меньше то A , получаемого на выходе источника электрического напряжения.

Таким образом достигается необходимое условие выполнения требований по обеспечению взрывобезопасности, а именно обеспечению минимальной электрической энергии поджигания топливновоздушной смеси (МЭП), накапливаемой межэлектродном промежутке топливной форсунки, при которой исключается воспламенение керосиновоздушной смеси. Ниже МЭП поджигание керосиновоздушной смеси невозможно. Этому способствует и использование в топливной форсунке переменного электрического напряжения.

Кроме того, для обеспечения высокого быстродействия воздействия электрического поля на топливо параллельно эквивалентному сопротивлению нагрузки на выходе источника электрического напряжения подсоединен в топливной форсунке другой (второй) резистор. Он ограничивает максимальный уровень накапливаемой электрической энергии в емкостной нагрузке при работе топливной форсунки.

Для повышения частоты выходного напряжения большое значение имеют постоянные времени выходной цепи источника электрического напряжения. При использовании схем умножителей напряжения (удвоения) для повышения выходного напряжения необходимо иметь в виду, что схема удвоения по своему принципу действия должна иметь емкости. Поэтому для повышения частоты коммутации ограничивают напряжение, сводя эти емкости до минимального значения (десятки пикофарад). Для обеспечения максимального быстродействия и нагрузочной способности умножителей напряжения используется двукратное уменьшение емкости конденсаторов в ступенях.

Конструкция разработанной [22] электропневматической топливной форсунки представлена на рисунке 3.6 и рисунке 3.7.

На рисунке 3.6 и рисунке 3.7 приняты следующие обозначения:

1 – трубка подвода топлива; 2 – корпус топливной форсунки; 3 – сопло топливного распылителя (распыливающее сопло); 4 – топливный завихритель с тремя тангенциальными пазами 19; 5 – воздушный наружный завихритель; 6 – металлическая пленка; 7 – изоляционная керамическая втулка; 8 – воздушный внутренний завихритель; 9 – изоляционная керамическая трубка; 10 – крышка; 11 – потенциальный электрод; 12 – металлическая шайба; 13 – гайка; 14 – стойки центрального стержня; 15 – центральный металлический стержень; 16 – источник электрического напряжения; 17 – первый резистор $R1$; 18 – второй резистор $R2$; 19 – паз топливного завихрителя; 20 – топливный распылитель.

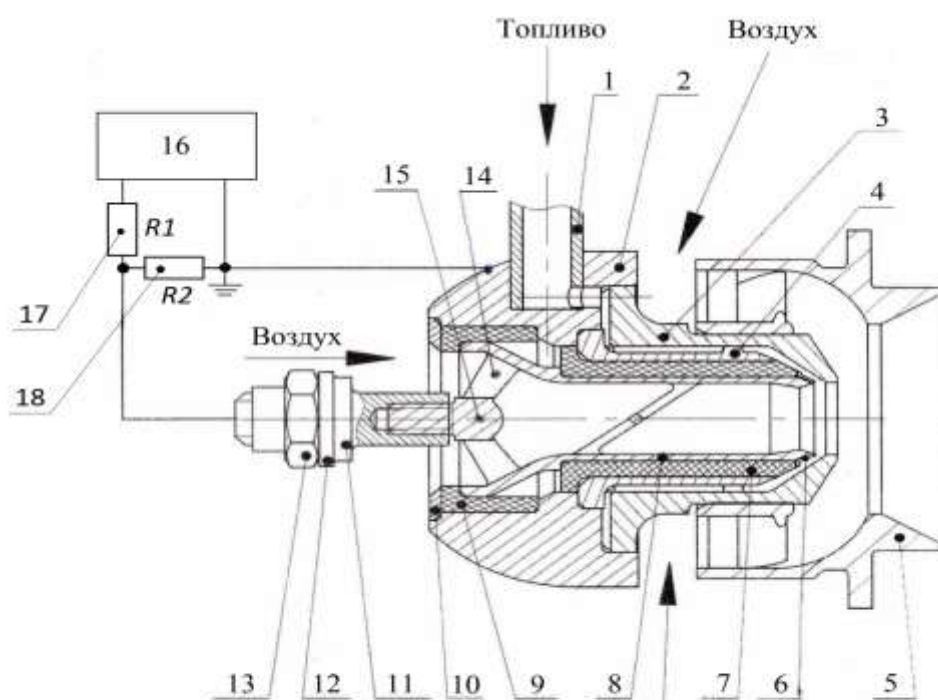


Рисунок 3.6 – Обеспечение пожаровзрывобезопасности, электробезопасности и повышения быстродействия электрических устройств воздействия на топливо при конструктивной реализации электродной системы в разработанной электропневматической форсунке [22]

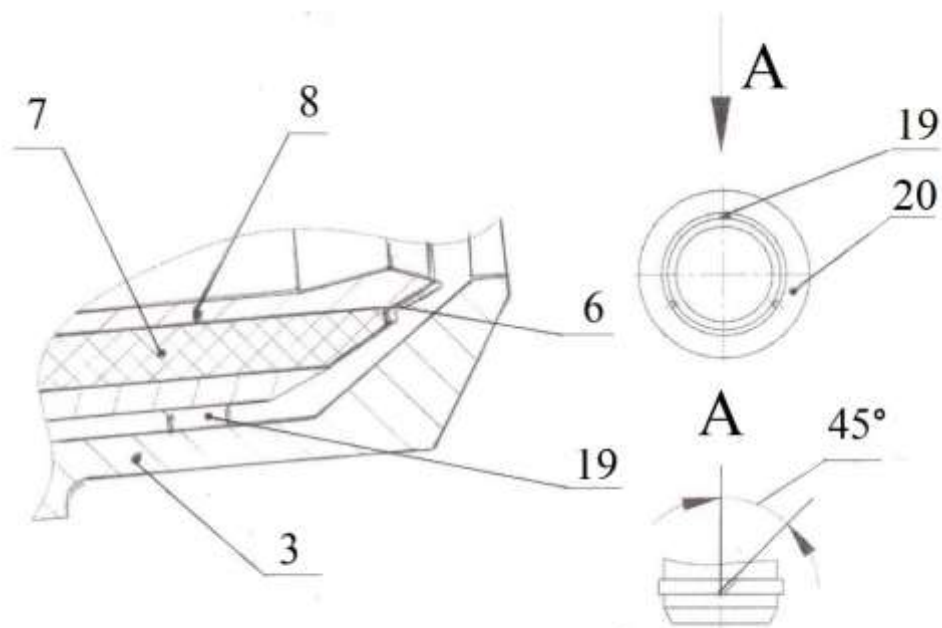


Рисунок 3.7 – Реализация разработанной технологии получения резко неоднородного электрического поля в электродной системе в электропневматической форсунке [22]

Воздушный внутренний завихритель 8 выполнен с входным (по направлению потока воздуха) конфузуром и выходной острой кромкой (см. фиг.1), радиус закругления которой составляет 1-5 мкм. Во входном конфузуре внутреннего воздушного завихрителя 8 располагается центральный металлический стержень 15, механически соединенный посредством четырех стоек 14 с внутренними стенками конфузора. При этом обеспечивается хороший электрический контакт стоек 14 с внутренними стенками конфузора внутреннего воздушного завихрителя 8 таким образом, чтобы их электрическое сопротивление было одинаковым.

В центральном металлическом стержне 15 выполнена резьба для резьбового присоединения специального металлического электрода 11 посредством гайки 13 и шайбы 12 к потенциальному выходу источника электрического напряжения 16. Сборка 13, 12, 11 с наружной частью центрального стержня 15 размещается в изолирующей трубке (на рисунке 3.5 не

показанной) для обеспечения требований техники безопасности. Внутренний воздушный завихритель 8 выполнен из металла и изолирован от корпуса форсунки 2 с помощью керамической втулки 7 и керамической трубки 9, материал которых выбран из условий обеспечения хороших изоляционных свойств с одновременным выполнением требований обеспечения жаропрочности, поскольку при работе топливной форсунки в авиационном двигателе температура внешней среды может достигать 800 °С. Поэтому в предлагаемой топливной форсунке в качестве материала керамических втулки 7 и трубки 9 выбрана керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика Al₂O₃- 95 %, ZrO₂ - 5 %.

На выходную острую кромку с радиусом закругления 1-5 мкм внутреннего воздушного завихрителя 8, собранного совместно с изоляционной керамической втулкой 7, нанесено проводящая металлическая пленка (проводящее металлическое покрытие) 6 из тугоплавкого металла, например, вольфрама, титана (см. фиг.2) толщиной 1-5 мкм. При этом металлическая плёнка 6 на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 заканчивается со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм.

Таким образом в предлагаемой электропневматической топливной форсунке [22] потенциальным электродом, соединенным через резистор 17 с потенциальным выходом источника электрического напряжения 16, являются центральный металлический стержень 15, размещенный во входном конфузоре внутреннего металлического воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой, сам внутренний металлический воздушный завихритель 8 с острой выходной кромкой, пленка 6 из тугоплавкого металла на данной острой кромке и на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 в топливном канале с закрученным потоком топлива. При этом пленка 6 заканчивается на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм.

В свою очередь, внутренний воздушный канал образован внутренними поверхностями центрального металлического стержня 15, размещенного с помощью стоек 14 во входном конфузоре внутреннего металлического воздушного завихрителя 8, внутренние поверхности внутреннего воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой.

Вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника электрического напряжения 16 и с выходом резистора 18 (вход резистор 18 соединен с выходом резистора 17), является внутренняя поверхность распыливающего сопла 3 топливного распылителя 20 в топливном канале, металлические корпус 2 и наружный воздушный завихритель 5.

Следовательно, отличительные от прототипа признаки состоят в том, что одним из электродов, соединенным через резистор 17 с потенциальным выходом источника переменного электрического напряжения 16, являются металлические центральный стержень 15 во внутреннем воздушном канале, внутренний воздушный завихритель 8, выполненный с входным конфузуром и выходной острой кромкой с радиусом закругления 1-5 мкм, металлическая пленка 6 из тугоплавкого металла на данной острой кромке и на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 в топливном канале с закрученным потоком топлива, одной из стенок которого является внутренняя поверхность распыливающего сопла 3, одновременно являющаяся вместе с металлическими корпусом 2, наружным воздушным завихрителем 5 вторым электродом, соединённым с выходом «земля» источника переменного электрического напряжения 16. При этом выходы источника переменного электрического напряжения 16 соединены через резисторы 17, 18, а пленка 6 заканчивается на выходном торце изолирующей керамической втулки 7 со стороны распыливающего сопла 3, образуя игольчатые электроды толщиной 1-5 мкм. Закрутка потока топлива в топливном канале осуществляется с помощью топливного завихрителя 4 с тремя тангенциальными пазами 19.

Детали внутреннего воздушного контура форсунки вставляются в корпус 2 и прижимаются крышкой 10. Крышка 10 фиксирует внутреннюю конструкцию

форсунки, но данная крышка электрически не контактирует с потенциальным электродом топливной форсунки.

Разработанная конструкция электропневматической топливной форсунки газотурбинного авиационного двигателя [22] обеспечивает повышение быстродействия и взрывобезопасности, конструктивное упрощение и повышение технологичности изготовления топливной форсунки при одновременном повышении качества распыла топлива за счет уменьшения диаметра распыливаемых капель топлива и сообщении им униполярного электрического заряда. Это обусловлено следующим:

- обеспечением минимальной электрической энергии поджигания топливно-воздушной смеси, использованием маломощного (1 – 2 Вт) источника переменного электрического напряжения 16 с рабочими токами единицы микроампер и ниже, обладающего внутренней взрывобезопасностью и исключением возможности накопления в межэлектродном промежутке количества электрической энергии, достаточного для создания мощной искры, вызывающей взрыв. Кроме того для этого в потенциальную цепь источника электрического напряжения 16 последовательно с емкостной нагрузкой электродов включен резистор 17, что ограничивает электрический ток между электродами. В свою очередь, переменное электрическое напряжение с выхода источника электрического напряжения 16 осуществляют с изменяющейся частотой следования пачек импульсов (до 50 кГц) с изменением амплитуды импульсов напряжения в пачке (уменьшением амплитуды напряжения в пачке по экспоненте с постоянными времени до 100 мкс). Длительность фронта импульса в пачке импульсов не превышает 1 мкс, а амплитуда переменного напряжения не превышает 4 кВ;

- обеспечением высокого быстродействия воздействия электрического поля на топливо за счет того, что параллельно эквивалентному сопротивлению нагрузки на выходе источника электрического напряжения 16 подсоединен резистор 18, одновременно ограничивающий максимальный уровень накапливаемой электрической энергии в емкостной нагрузке электродов

топливной форсунки. При этом используются схемы умножителей напряжения с двухкратным уменьшением емкости конденсаторов в ступенях умножения источника электрического напряжения, причем эти емкости имеют очень малые значения (десятки пикофард).

- сообщением закрученным в одном направлении потокам топлива и воздуха униполярного электрического заряда в резко неоднородном поле между электродами типа «игла – плоскость», где роль иглы играют срезы напыленной тугоплавкой металлической пленки на выходном торце изолирующей керамической втулки и острая выходная кромка внутреннего воздушного распылителя, а роль плоскости – внутренняя поверхность распыливающего сопла;

- применением изоляционных керамических деталей простой формы, потому что при этом существенно упрощается их изготовление и уменьшается количество брака, поскольку обработка на современных станках твердых и хрупких керамических заготовок с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающих температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевой керамики Al_2O_3 - 95 %, ZrO_2 - 5 %, является технологически сложной;

- в предлагаемой конструкции электропневматической топливной форсунки максимально уменьшено число изоляционных керамических деталей (их всего две), при этом, как уже отмечалось выше, сами керамические детали имеют простую форму и сниженные требования к точности изготовления, что улучшает технологичность их изготовления:

- повышением надежности крепления изоляционных керамических деталей к металлу, поскольку в предлагаемой конструкции топливной форсунки не требуется применения относительно ненадежной органосиликатной композиции, например, органосиликатной эмали, в качестве клея для крепления керамики к металлу. Предлагаемая конструкция топливной форсунки полностью сварная. Детали внутреннего воздушного контура форсунки вставляются в корпус и прижимаются крышкой, которая в свою очередь приваривается к корпусу. Это

повышает надежность и максимально возможную температуру применения топливной форсунки;

- применением конструктивно простой системы подвода электрического напряжения от источника электрического напряжения к потенциальному электроду топливной форсунки за счет изменения конструкции внутреннего воздушного завихрителя. В конструкцию внутреннего воздушного завихрителя на входе в форсунку введен центральный металлический стержень, на конце которого выполнена резьба. На резьбу в свою очередь устанавливается специальный электрод, к которому подводится электрическое напряжение.

Принцип действия данной [22] электропневматической топливной форсунки аналогичен принципу действия ранее рассмотренной ЭПФ [21] и основан на распыливании заданного объема топлива с использованием электрофизических и электрогидрогазодинамических эффектов (модификации топлива, уменьшение коэффициента поверхностного натяжения униполярно заряженных капель топлива, исключение слияния униполярно заряженных капель в топливо-воздушной смеси и других) в соответствующим образом организованных электрических полях от источника электрического напряжения 16, а также энергии воздушного потока. Игольчатые электроды образованы острой выходной кромкой воздушного внутреннего завихрителя 8 и краями нанесенной на нее и на торец изоляционной керамической втулки 7 металлической пленки 6 из тугоплавкого материала, например, вольфрама или титана (см. рисунок 3.6 и рисунок 3.7).

Для создания униполярного потока ионов знака потенциала игольчатого электрода используется резко неоднородное поле, которое прикладывается к закрученным потокам топлива и воздуха между кольцевыми коаксиальными электродами типа «игла» и выходом распыливающего сопла 3.

Все это позволяет увеличить, по сравнению с прототипом, эффективность параметров распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси в газотурбинных двигателях. Кроме того, использование энергии воздушного потока позволяет снизить перепад давления топлива на форсунке, что, в свою

очередь, способствует повышению ресурса как самой топливной форсунки, так и топливного насоса (на рисунке 3.5 не показанного). При этом используется энергия высокоскоростного закрученного с помощью внутреннего 8 и наружного 5 воздушных завихрителей воздушного потока, поступающего из компрессора (на фиг.1 не показанного).

Таким образом, на выходе данной топливной форсунки образуется гомогенизированная топливно-воздушная смесь, что также снижает уровень дымления в выхлопных газах газотурбинного двигателя.

Для распыливания заданного объема топлива, необходимо, чтобы поток топлива в топливном канале был преобразован в кольцевую пленку в распыливающем сопле 3. Для этого топливо в форсунку поступает через топливную трубку 1 и отверстие в корпусе 2 и далее попадает в кольцевой топливный канал и проходит через тангенциальные пазы 19 топливного завихрителя 4. После прохождения тангенциальных каналов топливного завихрителя 4 закрученный поток топлива под действием центробежных сил распределяется по внутренней поверхности канала распыливающего сопла - «префилмера» 3 в виде закрученной пленки и попадает на распыливающую кромку сопла, где встречается с потоком воздуха из центрального воздушного канала внутреннего воздушного завихрителя 8 с острой выходной кромкой. Данный канал образован внутренним каналом воздушного внутреннего металлического завихрителя 8 и его острой кромкой. Игольчатые электроды образованы острой выходной кромкой воздушного внутреннего завихрителя 8 и краями нанесенной на нее и на торец изоляционной керамической втулки 7 металлической пленки 6 из тугоплавкого материала, например, вольфрама или титана, толщиной (1-5) мкм. При этом, керамика выбрана из условий выполнения требований как по обеспечению необходимых изолирующих свойств, так и жаропрочности. Исходя из этих условий, в предлагаемой топливной форсунке использована керамика с относительной диэлектрической проницаемостью 3-15, выдерживающая температуру внешней среды до 800 °С, например, корундоциркониевая керамика типа Al_2O_3 - 95 %, ZrO_2 - 5 %. Напыленная

металлическая пленка 6 образует электрический контакт между игольчатым электродом внутреннего воздушного завихрителя и игольчатыми электродами на торце изоляционной керамической втулки 7. Таким образом реализуется потенциальный электрод топливной форсунки, который через проводящий центральный стержень 15, электрически контактирующий с металлическим диффузором внутреннего воздушного завихрителя 8, и электрод 11, подсоединяется к потенциальному выходу источника электрического напряжения 16.

При подаче электрического напряжения от источника 16 на электроды заявленной топливной форсунки между электродами типа «острие» и распыливающим металлическим соплом 3 возникает резко неоднородное электрическое поле и образуется униполярный поток ионов знака потенциала игольчатых электродов. При этом закрученной топливной пленке и закрученном потоку воздуха сообщается униполярный электрический заряд. Сообщается также униполярный заряд и каплям топлива при распаде заряженной топливной пленки. Кроме того, при проходе потока топлива топливо модифицируется в однородном электрическом поле. Модификация топлива повышает эффективность сгорания топлива.

После срыва с кромки распыливающего сопла 3 топливно-воздушная пленка по периферии обдувается закрученным потоком воздуха из наружного осевого воздушного завихрителя 5. Омывающий границу раздела сред воздух имеет значительную скорость (80...100 м/с), возмущая и дестабилизируя ниже по потоку межфазную границу с образованием крупномасштабных связанных заряженных униполярно структур – «лигаментов». Заряженные униполярно лигаменты дробятся на более мелкие капли за счет кулоновских сил отталкивания и высоким уровнем турбулентных напряжений в сдвиговом слое, индуцированном закруткой потоков воздуха с наружной и внутренней стороны, которые затем поступают в основную зону горения камеры сгорания газотурбинного двигателя.

Таким образом, (по сравнению с прототипом) дополнительно к вышеуказанным отличиям:

- существенно уменьшается гидравлическое сопротивление электродной системы потоку топлива и воздуха;
- увеличивается надежность работы топливной форсунки, поскольку исключается засорение электродной системы;
- упрощается конструкция и увеличивается технологичность изготовления топливной форсунки;
- повышается эффективность распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси специальным образом организованных электрических полей.

Электрический заряд капель топлива снижает их поверхностное натяжение, что облегчает распад заряженной капли на более мелкие капли, интенсифицирует испарение заряженной капли при попадании капли в жаровую трубу.

Все эти обстоятельства способствуют интенсификации процессов распыла и горения топливно-воздушной смеси в турбореактивном двигателе, снижают тепловое излучение и, соответственно, снижают лучистый тепловой поток, негативно воздействующий на стенки жаровой трубы.

В связи с этим, в предлагаемом устройстве используется закрутка потоков в одном направлении для повышения устойчивости процесса горения в газотурбинном двигателе.

В основу разработанной [22] электропневматической топливной форсунки положены физикотехнические и физикохимические явления, подробно рассмотренные в п. 3.4.1.1 при анализе. Работы ранее разработанной электропневматической форсунки [21].

3.4.3 Разработка технологии получения и обработки электроизоляционных керамических деталей принципиально новых электрокаплеструйных электропневматических форсунок авиационных двигателей

По разработанной конструкторской документации [41] изготовлены впервые в мировой практике экспериментальные образцы электрокаплеструйных электропневматических форсунок [42] для двух конструктивных исполнений электропневматических форсунок авиадвигателей.

В процессе их изготовления разработана новая технология обработки и получения высокотвердых керамических деталей электропневматической форсунки, которые должны быть хорошими изоляторами (относительная диэлектрическая проницаемость 10–12) для изоляции металлических деталей электропневматической форсунки от высокого электрического напряжения и выдерживать высокую температуру до 800⁰ С при работе авиадвигателей.

3.4.3.1 Технология получения и обработки изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки

Изучен рынок керамики, выдерживающей температуру 800⁰ С и выше. В результате для дальнейших исследований были отобраны 2 образца керамики: диоксид циркония ZrO₂ и корундоциркониевая керамика, состоящая из оксида алюминия Al₂O₃ – 95% и диоксид циркония ZrO₂ – 5%. В ООО «Вириал» были получены образцы этих керамик. Проведены их электрофизические и физико-механические свойства, результаты которых представлены в таблице 3.4.

Результаты проведенных исследований показали (см. таблицу 3.4), что керамика на базе диоксид циркония ZrO₂ по диэлектрическим свойствам не пригодна для использования в качестве изоляционного материала соответствующих деталей электропневматической форсунки, так как слишком велика ее относительная диэлектрическая проницаемость, хотя она удовлетворяет требованиям жаростойкости.

Поэтому для дальнейших исследований и проработок была выбрана корундоциркониевая керамика, состоящая из оксида алюминия Al₂O₃-95% и диоксид циркония ZrO₂ – 5%. Проведены спектроскопические исследования

образца из данной керамики в виде заготовки трубки изоляционной (ВРЛМ.715141.033) [41].

Исследуемый образец, установленный в пробозагрузочное устройство, в рабочем положении облучался рентгеновской трубкой. В результате взаимодействия рентгеновского излучения с веществом в исследуемом образце возникает вторичное флуоресцентное излучение, в спектре которого присутствуют характеристические линии тех элементов, которые входят в состав образца. Наличие в спектре линий данного элемента свидетельствует о присутствии его в образце, а интенсивность этих линий позволяет судить о содержании элементов.

Таблица 3.4 – Физические и электрофизические свойства исходных образцов кера-мик при выборе электроизоляционного материала деталей электропневматической форсунки

Параметр исследуемой керамики	Значение	
	ZrO ₂	Al ₂ O ₃ -95%/ZrO ₂ -5%
Плотность, г/см ³ , не менее	6,00	4,00
Прочность на изгиб, МПа, не менее	900	500
Трещиностойкость, МПа*м ^{1/2} не менее	10	4
Твердость по Виккерсу, ГПа не менее	12	18
Относительно диэлектрическая проницаемость	44,18	11,2
Диэлектрические потери ($tg\delta$)	0,02	0,004

Принцип действия спектрометра основан на последовательном выделении кристаллом характеристических линий флуоресцентного излучения исследуемого образца, возбуждаемого излучением острофокусной рентгеновской трубки, регистрации интенсивности этих линий и пересчета их в содержание соответствующих элементов [41].

Спектрометр построен по оригинальной рентгенооптической схеме, обладающей высокой светосилой. Характеристическое рентгеновское излучение легких элементов ($Z < 20$) сильно поглощается воздухом, поэтому механизм гониометра вакуумирован. Входное окно вакуумной камеры максимально приближено к поверхности образца (расстояние 2 мм), что позволяет выделять аналитические линии легких элементов (от натрия) при расположении образца на воздухе.

Спектрометрическое устройство обеспечивает взаимное расположение входной щели, кристалл-анализатора и детектора, необходимое для получения спектра по методу Иоганссона (для кристаллов LiF200, LiF220, PET, KAP) или по методу Иоганна (для кристаллов C002, RbAP).

На рисунке 3.8 схематично изображена рентгенооптическая схема спектрометра, поясняющая его работу. Первичное излучение РТ 3 возбуждает в исследуемом образце 1 флуоресцентное излучение, которое через окно 2 вакуумной камеры и через входную щель 7 попадает на фокусирующий кристалл-анализатор 6, выделяющий из спектра образца характеристическую линию, соответствующую условиям отражения по закону Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d\sin\Theta,$$

где n - порядок отражения ($n = 1, 2, \dots$); λ - длина волны падающего излучения, d - межплоскостное расстояние кристалл-анализатора, A ; Θ - угол падения излучения на кристалл, град.

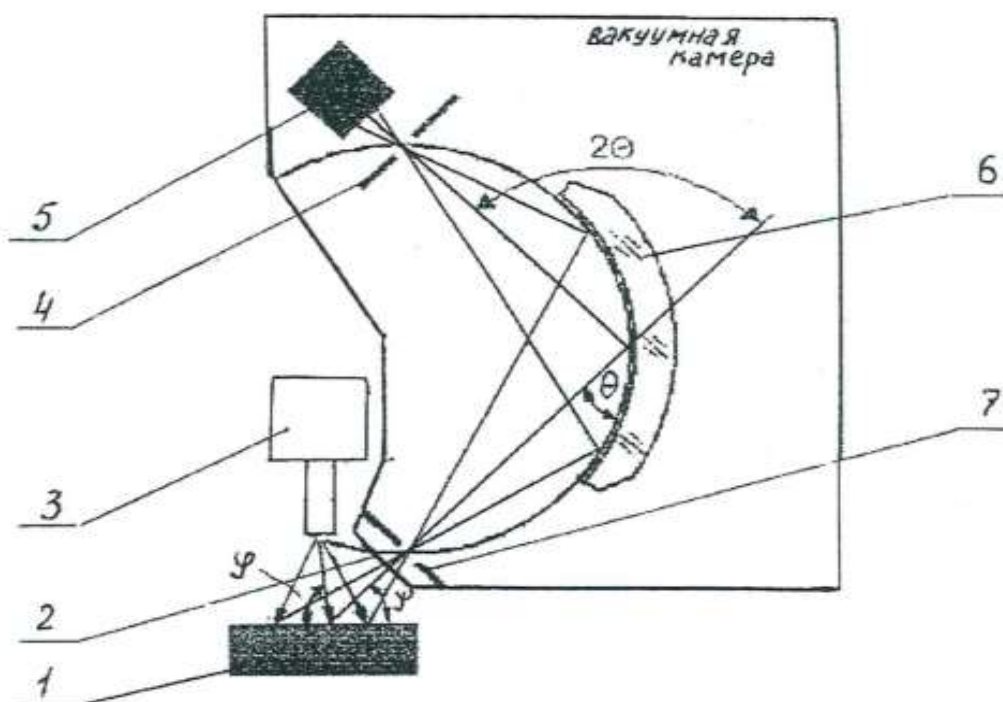
Угол падения первичного излучения на образец $\varphi = 60^\circ$, угол отбора вторичного излучения $\Psi = 40^\circ$.

Качественный рентгенофлуоресцентный анализ обнаружил в образце присутствие циркония и иттрия. Поскольку рентгенофлуоресцентный анализ проводился на воздухе, то определялись элементы только тяжелее кальция.

В результате рентгенофазового анализа установлено, что данная керамика состоит из $\sim 96,8\%$ Al_2O_3 – фаза (корунд) + $2,3\%$ $\text{Zr}_{0,95}\text{Y}_{0,05}\text{O}_{1,975}$ + $0,9\%$ ZrO_2 . Корунд, $\text{Zr}_{0,95}\text{Y}_{0,05}\text{O}_{1,975}$ и ZrO_2 имеют соответственно тригональную, тетрагональную и моноклинную решетку.

Исходя из теоретической плотности фаз, обнаруженных в образце, и их количества, расчетная плотность образца составляет $4,058 \text{ г/см}^3$.

Экспериментальная плотность образца равна $4,01 \text{ г/см}^3$. Согласно проведенным оценкам, пористость образца находится на уровне $\sim 1\%$.



сунук 3.8 – Рентгенооптическая схема при исследовании образца корундоциркониевой керамики для разработанных электропневматических форсунок:

- 1– исследуемый образец; 2 – окно вакуумной камеры; 3 – рентгеновская трубка; 4 – приемная (выходная) щель; 5 – блок детектирования; 6 – кристалл-анализатор; 7 – входная щель

Параметры решеток фаз и их плотность приведены в таблице 3.5

Таблица 3.5 – Результаты рентгенофазового анализа образца корундоциркониевой

Керамики для разработанных электропневматических форсунок

Наименование фазы	Параметры решетки	Плотность , г/см ³
Al ₂ O ₃ - α фаза (корунд)	a = 4,75574 Å; c = 12,98577 Å	3,994
Zr _{0,95} Y _{0,05} O _{1,975}	a = 3,60852 Å; c = 5,17097 Å	6,078
ZrO ₂	a = 5,13941 Å; b = 5,20865 Å; c = 5,31552 Å	5,814

Проведенный металлографический анализ показал, что после слабого травления образца в кипящей ортофосфорной кислоте в течение 30 – 40 минут, в структуре на фоне матрицы были выявлены частицы двух морфологических типов, а именно, темные частицы преимущественно призматической формы (рисунок 3.9 а,б по стрелке А) и светлые мелкодисперсные частицы, как правило, глобулярной формы (рисунок 3.9 а,б по стрелке Б). Как темные, так и светлые частицы хаотично располагаются по всей плоскости шлифа. Размер темных призматических частиц колеблется от ~ 1,5 x 2,5 до ~ 2 x 9 мкм, а светлых частиц – не превышает 2,5 мкм. Данные частицы двух типов, по-видимому, относятся к двум разным фазам. Сопоставляя полученные

фотографии структуры с результатами рентгенофазового анализа, можно предположить, что темные частицы, занимающие более значительный объем образца, можно идентифицировать как фазу $Zr_{0,95}Y_{0,05}O_{1,975}$, а светлые выделения – как фазу ZrO_2 .

Дальнейшее травление образца в течение нескольких часов привело к выявлению структуры корундовой матрицы (рисунок 3.9 в-е).

Из данных фотографий видно, что структура матрицы мелкозернистая и состоит из кристаллов как призматической (по стрелке В), так и изометрической (по стрелке Г) формы. Размер изометрических зерен колеблется от ~ 2 до 10 мкм, а призм – не превышает $\sim 8 \times 12$ мкм. Внутри зерен наблюдаются мелкие поры (по стрелке Д), размер которых не превышает ~ 1 мкм.

Кроме того, можно видеть, что обнаруженные ранее светлые частицы, которые предположительно являются окисью циркония ZrO_2 , расположены преимущественно по границам кристаллов корунда (рисунок 3.9 в-е по стрелке Е). Такое расположение мелкодисперсной фазы, как известно, препятствует развитию собирательной рекристаллизации.

Микротвердость образца составляет ~ 18 – $18,5$ ГПа.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что данная корундоциркониевая керамика в своем составе содержит окислы циркония двух типов, суммарная доля которых составляет $\sim 3,2$ %. Кроме того, она имеет низкую пористость, однородную мелкозернистую структуру и высокий для данной керамики уровень твердости.

В результате проведенных исследований в качестве материала для изолирующих деталей изготавливаемой (на базе результатов численного моделирования с использованием суперкомпьютерных вычислительных кластеров электропневматической форсунки выбрана корундоциркониевая керамика, состоящая из оксида алюминия Al_2O_3 – 95% и диоксид циркония ZrO_2 – 5%.

Разработаны чертежи керамических заготовок для последующего на их базе изготовления соответствующих корундоциркониевых заготовок. В качестве

примера на рисунке 3.10 представлен чертеж заготовки для электроизоляционной трубки электропневматической форсунки. Керамические заготовки разработаны с позиций обеспечения минимума последующей работы по изготовлению соответствующих деталей электропневматической форсунки. На их основе разработаны пресс-формы для каждой из заготовок.

Разработана технология получения керамических заготовок, включающая в себя следующие операции:

- 1) разработка и изготовление технологической оснастки (пресс-форм);
- 2) смешение порошков оксида алюминия и диоксида циркония;
- 3) приготовление пресс-порошка;
- 4) прессование заготовок;
- 5) отгонка пластификатора и спекание;
- 6) окончательная механическая обработка (торцы, внутренний диаметр, отверстие, наружный диаметр, фаски и т.п.).

Используя вышеперечисленную схему, были получены экспериментальные заготовки. Одновременно с заготовками по аналогичной схеме изготавливались аттестационные образцы для оценки физико-механических характеристик получаемого материала.

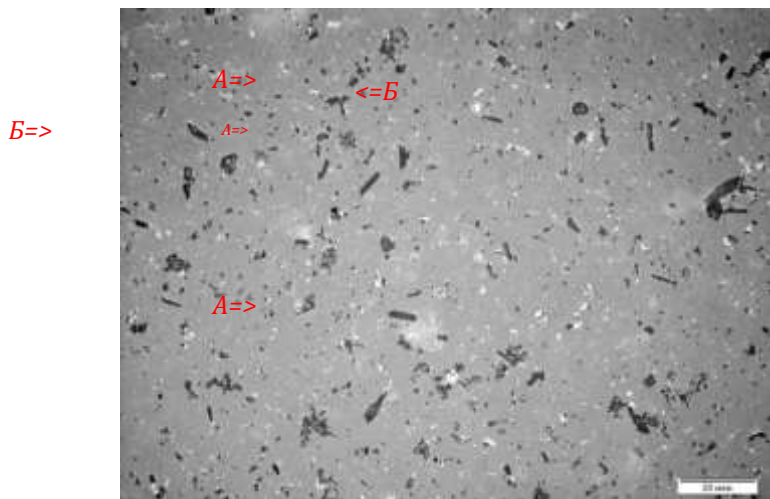
Для прессования использовался холодный изостатический пресс типа EPSI SO12720.

В результате были изготовлены заготовки из корундоциркониевой керамики различных конструктивных исполнений в количестве 10 штук по каждому исполнению (рисунок 3.11).

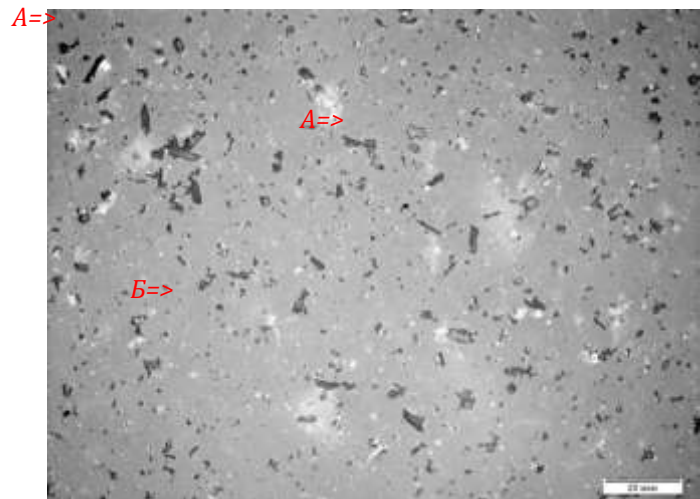
На полученных заготовках проверялись геометрические размеры, а так же определялась плотность материала заготовки.

На аттестационных образцах измерялись физико-механические параметры. Результаты измерений представлены в таблице 3.6.

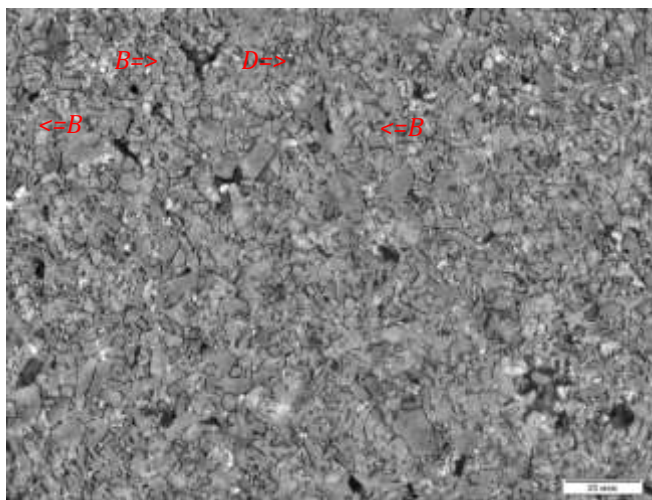
Б=>



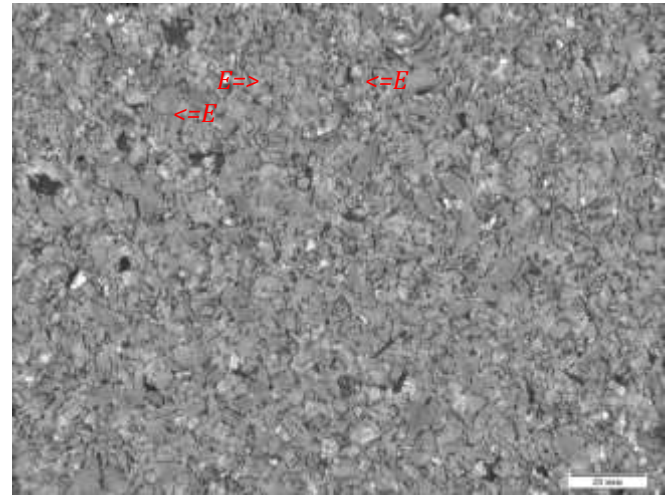
а)



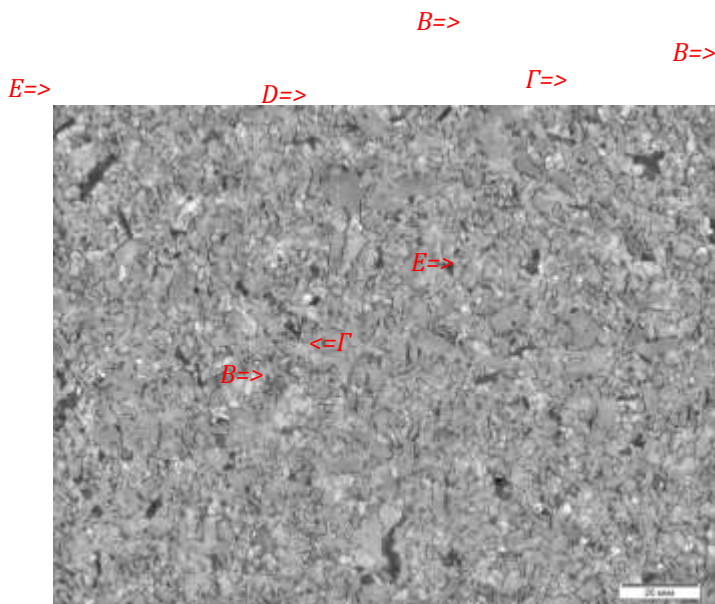
б)



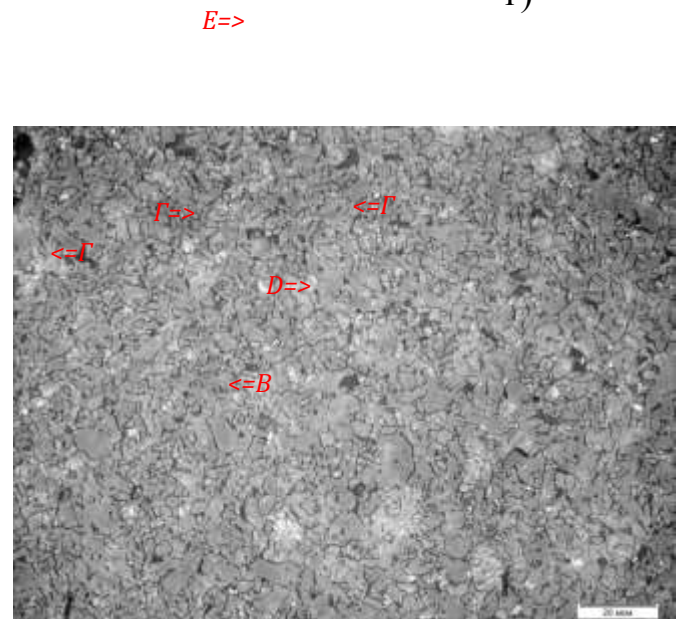
в)



г)



д)



е)

исунок 3.9 – Металлографический анализ образца корундоциркониевой керамики

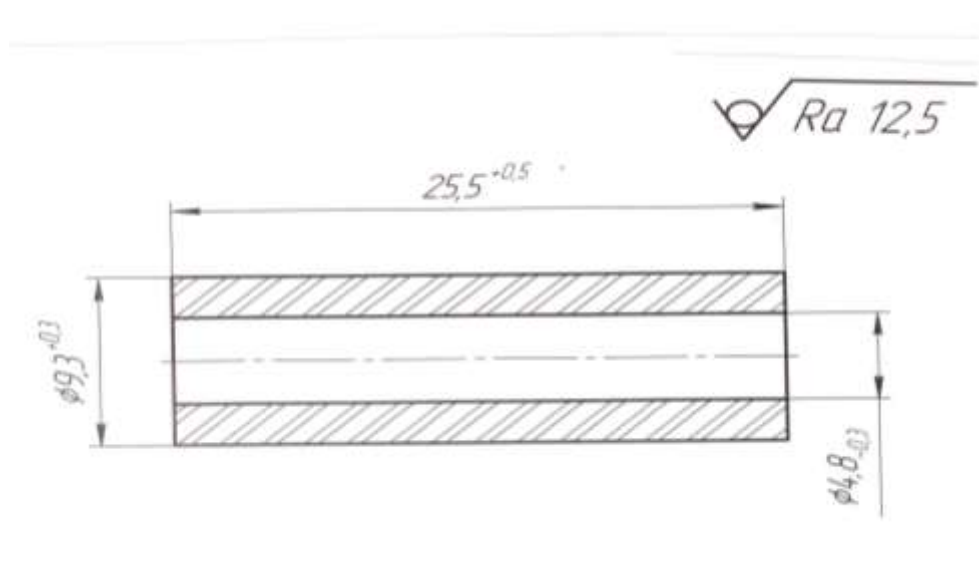


Рисунок 3.10 – Чертеж заготовки для электроизоляционной трубки электропневматической форсунки из корундоциркониевой керамики



Рисунок 3.11 – Изготовленные заготовки из корундоциркониевой керамики для разработанной электропневматической форсунки

Таблица 3.6 – Параметры заготовок и аттестационных образцов

Наименование показателя	Значение показателя		Соответствие требованиям
Показатели, измеряемые на заготовках			
Геометрич. Параметры	По рисункам 1.24–1.27		Соответствуют
Плотность г/см ³	не менее	4,0	Соответствуют
Показатели, измеряемые на аттестационных образцах			
Плотность, г/см ³	не менее	4,0	Соответствуют
Прочность на изгиб, МПа	не менее	500,0	Соответствуют
Трещиностойкость, МПа*м ^{1/2}	не менее	4,0	Соответствуют
Твердость по Виккерсу, ГПа	не менее	18,0	Соответствуют

Также на аттестационных образцах керамических заготовок проводилось исследование микроструктуры материала заготовки (рисунок 3.12).

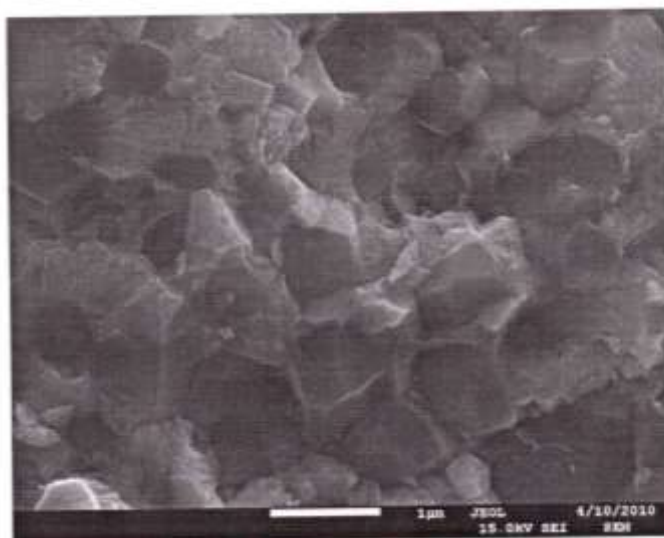


Рисунок 3.12 – Фотография микроструктуры корундоциркониевой керамики на полученных аттестационных образцах заготовок для разработанных электропневматических форсунок

3.4.3.2 Технология изготовления изоляционных керамических деталей разработанных электропневматических форсунок

Для изготовления керамических деталей электропневматической форсунки (ЭОФМ) пришлось решать проблему их обработки, поскольку технология получения таких деталей разрабатывалась впервые. В результате остановились на использовании для этих целей универсального обрабатывающего центра Ultrasonic 20 linear [41].

Для изготовления изоляционных деталей электропневматической форсунки (использовалась ранее рассмотренные заготовки из корундоциркониевой керамики (Al_2O_3 – 95%, ZrO_2 – 5%)) со следующими свойствами:

- относительная диэлектрическая проницаемость – 11,2;
- $\text{tg}\alpha$ для диэлектрических потерь – 0,004;
- плотность – 4,0 г/см³;
- прочность на изгиб – не менее 500 МПа;
- трещиностойкость – не менее 4 МПа × м^{1/2};
- твердость по Виккерсу – не менее 18 ГПа;

Так как подобная керамика обрабатывается впервые работы по изготовлению изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки (ЭОФМ) выполнялась в 2 этапа.

На первом этапе осуществлялось опытное изготовление с целью подбора инструмента и режимов обработки. После этого на втором этапе производилось изготовление основной партии.

Опытное шлифование керамики выполнялось на обрабатывающем центре «Ultrasonic 20-5» алмазными борфрезами «МонАлит» на металлической связке.

Как показали предварительные данные при изготовлении опытных деталей, материал керамики очень хрупкий, а так как борфреза на металлической связке работает жестко и правка ее не производилась, то было дано

предположение именно это и является причиной появления сколов керамики (рисунок 3.13).

В результате отработки технологии изготовления выданы рекомендации по обработке основной партии изоляционных керамических деталей алмазными кругами на органической связке.

Применение алмазных кругов на органической связке может уменьшить или исключить скалывание на острых кромках детали. Так же выданы рекомендации по режимам шлифования для основной партии.

Основная партия обрабатывалась на станке Ultrasonic 20 linear.

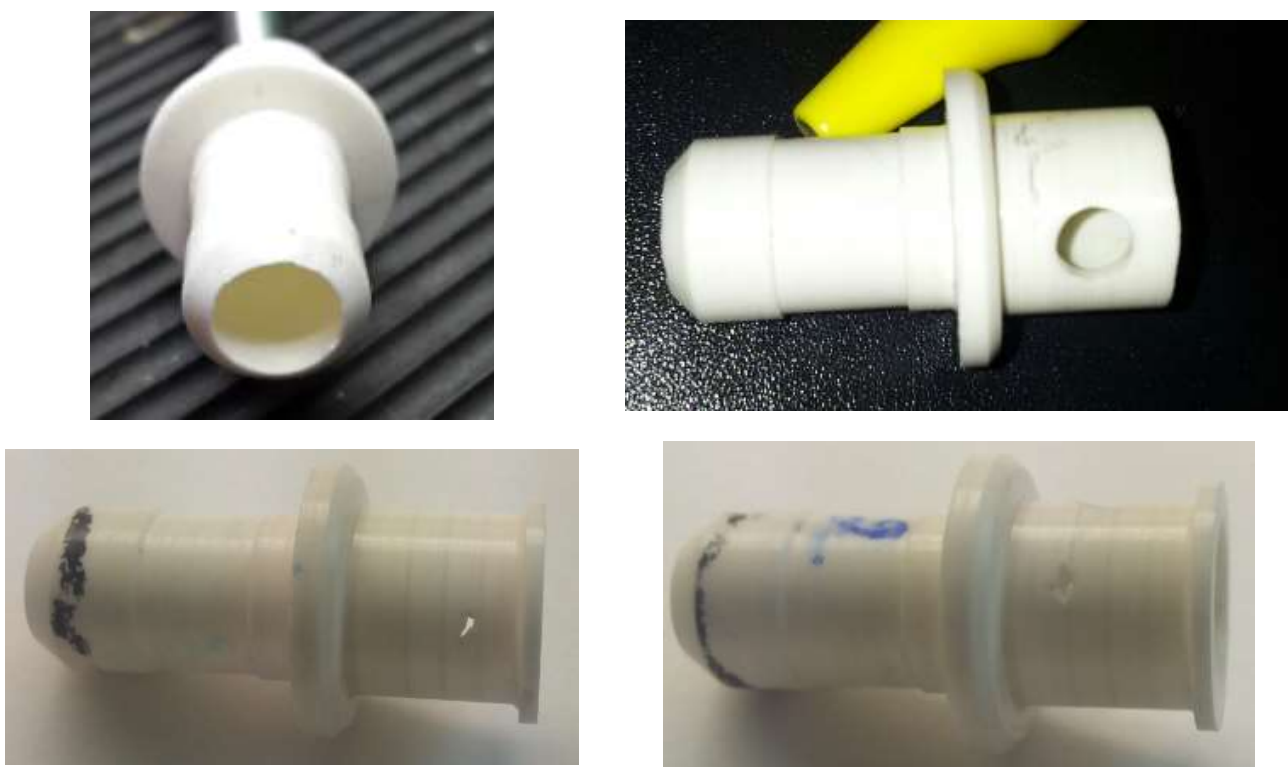


Рисунок 3.13 – Дефекты при изготовлении керамических деталей электропневматической форсунки при отработке технологии их изготовления

Используемые алмазные головки (диски, цилиндрические) для выполнения опытных работ по обработке керамики, имеют точность не высокую (имеется

радиальное биение), но достаточную для выполнения обработки подобной партии деталей. Однако для исключения сколов необходимо уменьшить величины алмазного зерна и радиального биения, но для этого потребуется более дорогостоящий алмазный инструмент.

Средняя шероховатость для обработанных поверхностей на изготовленных деталях составила $Ra=2,4$ мкм, что удовлетворяет требованиям чертежа.

Трудоемкость обработки деталей составила в среднем 3 часа.

На некоторых керамических заготовках при обработке вскрываются внутренние дефекты керамики заготовок, проходящие насквозь через стенку. Поэтому некоторые детали во время обработки треснули пополам. Для исключения брака на поздних этапах изготовления необходим 100% контроль сплошности керамических заготовок.

3.4.3.3 Разработка режимов обработки изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки

Несмотря на эти трудности, удалось отработать технологию изготовления деталей авиационных двигателей из корундоциркониевой керамики, что представляет самостоятельный научный и практический интерес.

Первоначальные опробования отработки произведены с использованием заготовки одной детали.

Разработана операция обработки керамической заготовки распылителя на станке Ultrasonic 20 linear. Подобран инструмент фирмы «Рус-Атлант» (Москва).

Режимы обработки.

- Головка шлиф. МГАц $\theta 10 \times 20 L=60$;
 $n=38000$ об/мин.; $S_m=1400$ мм/мин.

Обработка по спирали к центру с шагом 0,005 мм.

- Головка шлиф. МГАд $\theta 30 \times 3,0 L=50$;
 $n=20000$ об/мин.; $S_m=736$ мм/мин.

Обработка по спирали к центру с шагом 0,005 мм.

- Головка шлиф. *МГАц* $\theta 4,0 \times 6$ $L=50$;
 $n=38000$ об/мин.; $S_m=1400$ мм/мин.
Обработка по спирали к центру с шагом $0,005$ мм.
- Головка шлиф. *МСК 3-4*;
 $n=38000$ об/мин.; $S_m=1$ мм/мин. (Обработка отверстия)

Далее на этих же режимах произведена обработка остальных керамических деталей.

Были изготовлены в соответствии с разработанной конструкторской документацией [41] керамические изоляционные детали из корундоциркониевой керамики для двух модификаций электропневматической форсунки, фотографии которых представлены на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Керамические детали, изготовленные из корундоциркониевой керамики для электропневматической форсунки

В заключение этого раздела отметим, что при изготовлении металлических деталей разработанных [20 - 22] электрокаплеструйных электропневматических форсунок (см. рисунки 3.5 – 3.7) можно использовать основные положения, изложенные автором в работах [29 - 35].

3.5 Выводы по разделу

1. На основании сформулированных критериев и показателей эффективности направлений исследований по разработке электрокаплеструйных форсуночных модулей предложена стратегия исследований и разработок форсуночных модулей с электрическими устройствами воздействия на топливо (ЭУВТ), основанная на разработанной технологии Динамического конструирования на базе результатов численных исследований рассматриваемых процессов с верификацией экспериментом. Мировая новизна и практическая значимость полученных результатов подтверждены выдачей автору 6 патентов Российской Федерации на методы повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных газотурбинных двигателях и электропневматические форсунки [16 - 22].
2. Впервые в мире применительно к газотурбинным авиационным двигателям (на примере современного авиадвигателя типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения топливно-воздушной смеси с использованием ЭУВТ и переменных однородных электрических полей с изменяющейся частотой, резко неоднородных постоянных и переменных электрических полей и их совместного использования.
3. Разработаны принципы построения форсуночных модулей с использованием ЭУВТ в гидравлической цепи питания топливной форсунки и в самой форсунке и различных типов электрических полей.
4. Разработаны принципиально новые методы конструирования электрокаплеструйных электропневматических форсунок газотурбинных авиадвигателей с использованием резко неоднородных электрических полей. Эти методы предусматривают использование конструктивных элементов топливной форсунки при реализации электродной системы ЭУВТ непосредственно в самой топливной форсунке.
5. Показано, что (применительно к условиям работы авиадвигателей) в качестве изолирующего материала соответствующих деталей

электропневматической форсунки целесообразно выбрать корундоциркониевую керамику, состоящую из оксида алюминия Al_2O_3 – 95% и диоксида циркония ZrO_2 – 5%.

6. Впервые в мировой практике разработана технология получения и обработки электроизоляционных керамических деталей электропневматической форсунки из корундоциркониевой керамики. Разработанные технологии представляют самостоятельный научный и практический интерес не только для авиадвигателестроения, но и для других отраслей промышленности.
7. Впервые в мировой практике разработаны и реализованы режимы обработки изоляционных керамических деталей электропневматической форсунки (ЭОФМ) из корундоциркониевой керамики на современных обрабатывающих центрах.
8. Разработана технологии реализации резко неоднородного электрического поля в новых конструктивных решениях электропневматической форсунке газотурбинных авиационных двигателей. Данная технология предусматривает напыление тонкой пленки из тугоплавкого металла на соответствующие детали ЭПФ для получения очень малых радиусов закругления острия (до 1 – 3 мкм).
9. Предложены методы обеспечения пожаровзрывобезопасности, электробезопасности обслуживающего персонала и повышения быстродействия электрических устройств воздействия на топливо при конструктивной реализации электродной системы в электропневматической форсунке для создания резко неоднородного электрического поля. Эти методы реализованы в разработанных принципиально новых ЭПФ.

4 ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА УНИПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ КЕРОСИНА В ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЯХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТУРБОРЕАКТИВНЫМ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ

Резко неоднородные электрические поля целесообразно использовать в организации рабочего процесса в камерах сгорания турбореактивных двигателей. Закрученному потоку топлива сообщается в резко неоднородном электрическом поле униполярный электрический заряд. При сжигании заряженного топлива ожидается уменьшение количества возникающего дыма и других твердых продуктов неполного горения и таким образом уменьшается дымление и сажевыделение в факеле.

В данном разделе (на примере разработанного форсуночного модуля применительно к турбореактивным двигателям [1, 14,15]) рассмотрим прежде всего электрогидродинамические процессы инжекции в поток топлива (керосина) униполярного электрического заряда знака потенциала острого электрода, размещенного внутри топливной форсунки, и переноса заряда к выходному срезу сопла.

Электрический заряд закрученного потока на выходе из сопла форсунки определяет, в конечном итоге, и величину заряда, приобретаемого каждой каплей при распыле топлива, а следовательно, влияет на процессы сгорания топливновоздушной смеси в камере сгорания.

Конструкция выходной части рассматриваемого форсуночного модуля (см. ниже рисунок 4.1), ее габаритные, конструктивные и присоединительные размеры, соответствует штатной форсунке турбореактивного авиационного двигателя применительно к камере подогрева стартер воздушно газовый (КП СТВГ) турбореактивного авиадвигателя, рассмотренного в первой главе данной диссертации (см. рисунок 1.6 и рисунок 1.7).

4.1 Аналитический обзор литературы в области численного моделирования электрогидродинамических процессов в струях и потоках диэлектрических жидкостей

В ФГАОУ ВО «СПбПУ» более 40 лет ведутся успешные работы по управлению каплями, струями и потоками диэлектрических жидкостей электрическими полями применительно к электрогидропневмоавтоматике [81-91,164,299]. Здесь же рассмотрим более подробно публикации, в которых объектом исследования являлось численное моделирование электрогидродинамических процессов.

В [269, 270] объектом исследования являются диэлектрические жидкости. Экспериментально установлены некоторые электродинамические закономерности: введение в слабопроводящую жидкость объемного заряда приводят к нарушению гомогенности среды по её физическим параметрам. Для оценки изменения гомогенности жидкости используется экспериментальная оценка скорости звука в этой среде. Под действием электрического поля свойства жидкости меняются. Данное явление носит пороговый характер и увеличивается при обеспечении условий, способствующих увеличению плотности объемного заряда в жидкости.

К отдельной группе работ можно отнести статьи [299,266, 267, 271-274], в которых численно моделируются различные электрогидродинамические течения.

В [299] подробно рассматриваются:

- математические модели и методы численного расчета процессов управляемого получения линейного потока монодисперсных капель рабочих жидкостей электрокаплеструйных технологий с учетом взаимодействия струи рабочей жидкости с окружающим газом (вычислительная среда OPENFOAM 1.5);
- математические модели и методы численного расчета процессов управляемого получения линейного потока монодисперсных капель с

моделированием работы пьезоэлектрического преобразователя (вычислительная среда FLOW-3D);

- математические модели и методы численного расчета процессов турбулизации затопленных струй газа (вычислительная среда FLUENT).

Сквозное ЭГД-течение в канале в системе провод-провод рассматривается в [266, 267, 273, 274]. Описан процесс формирования и развития ЭГД-течений в симметричной системе электродов типа провод - провод на основе полной системы ЭГД-уравнений в двухмерном случае. Рассмотрена связь уровня зарядообразования от локальной напряженности поля в приэлектродной области. Вариация свойств контакта электрод - жидкость позволяет получать и исследовать различные типы ЭГД-течений. Приводятся результаты компьютерного моделирования ЭГД-течений для случая униполярной инжекции, симметричной биполярной и несимметричной биполярной инжекции.

В публикации [273] разработан алгоритм для компьютерного моделирования процесса формирования ЭГД течений в симметричной системе электродов провод-провод при включении напряжения, определяемый распространением двух заряженных струй от каждого из электродов вглубь межэлектродного промежутка в программном пакете Ansys Multiphysics. На первом шаге рассчитывается электростатическая задача с объемным зарядом, заданным в пределах кольца вокруг каждого из электродов. Из полученного на первом шаге решения находится распределение кулоновских сил в заряженной области. На втором шаге рассчитывается нестационарная гидродинамическая задача с распределенной нагрузкой в виде кулоновских сил, рассчитанных на первом шаге. Рассчитывается новая область распределения заряда, так как исходный заряд выносится течением вдоль линии тока жидкости, формирую заряженную струю. На третьем шаге решается электростатическая задача с новой областью распределения заряда. На четвертом шаге решается гидродинамическая задача с объемной нагрузкой, рассчитанном на третьем шаге. Строятся новые линии тока. Таким образом, в представленной модели ЭГД течение формируется в результате образования заряженной центральной струи, переносящей заряд в

межэлектродный промежуток. Для моделирования была выбрана система с симметричными электродами, размещенными в канале с диэлектрическими стенками, представленная. Модель представляет собой два бесконечных цилиндрических электрода, помещенных в трансформаторное масло. Диаметр электродов равен 1 мм, расстояние между электродами равно 1 см, что соответствует параметрам экспериментальных установок. Так как модель имеет вертикальную ось симметрии, то была построена только половина модели. В результате делается вывод, что при одинаковой плотности заряда в приэлектродных зонах у обоих электродов формируется встречные симметричные ЭГД течения. Подобный вывод подтвержден экспериментально.

В работе [274] используется несимметричное зарядообразование на активном и пассивном симметричных электродах. Приведены результаты компьютерного моделирования сквозного ЭГД-течения. В системе электродов провод-провод структура ЭГД-течения определяется соотношением скоростей ионообразования на катоде и аноде. Если эти скорости равны, то течение реализуется в виде двух потоков равной интенсивности. Потоки встречаются в центре межэлектродного промежутка, и там образуются боковые струи, идущие под углом 90° к первоначальному направлению струи. При нарушениях симметрии условий зарядообразования происходит искажение структуры течения: поток от электрода, на котором скорость зарядообразования выше, преобладает над встречным потоком, при этом боковые струи встречных потоков смещаются к электроду, у которого скорость зарядообразования ниже, угол наклона боковых струй к центральной оси течения становится острым. За межэлектродным промежутком появляется зона вторичного ускорения жидкости, способствующая образованию сквозного течения.

Сквозное течение – это предельный случай встречных течений, когда поток от одного из электродов намного интенсивнее, чем от второго. Угол наклона боковых струй к оси симметрии течения падает до очень малой величины, а сами струи выходят далеко за пределы межэлектродного промежутка. Для моделирования данного процесса используется пакет численного моделирования

Ansys, основанного на конечно-элементном методе решения поставленных задач. В работе приведены результаты решения задачи о симметричном и несимметричном (сквозном) течениях жидкости в симметричной системе электродов типа провод-провод. Замечены две зоны ускорения жидкости: зона ускорения в межэлектродном промежутке существенно растянута. Разработан алгоритм компьютерного моделирования задачи ЭГД-течения в стационарном случае, позволяющий решать широкий круг ЭГД-задач.

В статье [273] описывается влияние изолирующего материала стенок канала, используемого в статьях [273, 274]. Целью данной работы было компьютерное моделирование процесса формирования и развития ЭГД-течений в симметричной системе электродов типа провод–провод на основе полной системы ЭГД-уравнений в канале, который находится в открытом пространстве. Рассмотрено влияние диэлектрических стенок канала на электрогидродинамические течения в нем. Анализ влияния проведен на основе численного моделирования полной системы уравнений, включающей в себя уравнения Пуассона и Нернста–Планка. Гидродинамика модели рассчитывается из уравнений Навье–Стокса и неразрывности, которые записаны для приближения несжимаемой вязкой жидкости. Потенциал находится из уравнения Пуассона. Получены решения для моделей с узким и широким расположением стенок канала. В качестве параметра сравнения выбрана ширина профиля жидкости в межэлектродном промежутке в свободном пространстве. Для полученных решений приведены распределения скоростей и плотности электрического заряда. Построены зависимости КПД и расхода от ширины канала. Проведено моделирование сквозного ЭГД-течения в симметричной системе электродов провод–провод на осевое полной системы ЭГД-уравнений в плоском канале с диэлектрическими стенками, на которых заданы граничные условия типа бесконечности. Ток инжекции на электродах задавался в соответствии с зависимостью типа Шоттки. В данной работе рассмотрено влияние ширины канала на характеристики сквозного течения. Показано, что влияние стенок существенно при поперечных размерах канала меньше естественной ширины

центральной струйки сквозного ЭГД-течения. Влияние носит вязкий характер и связано с накоплением объемного заряда на диэлектрических стенках канала. Также в работе приведены зависимости интегральных характеристик, таких как КПД и расход жидкости, от ширины канала.

В статье [272] описывается конечно-элементное моделирование электрогидродинамических течений в геометрии игла - полость. При моделировании процессов была использована двумерная осесимметричная конечно-элементная модель: цилиндр высотой 20 мм и диаметром 30 мм, внутри которого располагается игла с диаметром основания 0,2 мм и радиусом закругления кончика 0,1 мм. Использовался пакет численного моделирования Ansys. Задача моделировалась на базе расчетной сетки со средним размером элемента 0,05 мм. Исследуемая жидкость – трансформаторное масло. Граничным условием являлось напряжение на электродах, условия на стенках, величина плотности объемного заряда и его начальное распределение. В области применялся итерационный подход моделирования заряженной струи. Пробное распределение объемного заряда на первом шаге задавалось в области вокруг электрода-иглы и в межэлектродном промежутке. Критерием оценки сходимости решения служило сохранение конвективного тока в профильных сечениях модели. В результате проведено исследование ЭГД-течений на основе анализа, как экспериментальных данных, так и результатов численного моделирования распределения объемного заряда в жидкости. Сделан следующий вывод: течение жидкости в данной модели локализовано в пределах узкой центральной области течения, вне этой области скорость значительно меньше максимальной.

В [268] описывается моделирование коронного разряда в пакете численного моделирования Ansys. Исследование коронного разряда производилось в системе электродов „игла–плоскость“. Это система с сильно неоднородным электрическим полем, ее использование позволяет существенно разделить напряжение зажигания коронного разряда и напряжение искрового пробоя.

Решение показывает, что стационарный режим возможен при напряжениях выше некоторого порогового значения. Это значение соответствует условию возникновения самостоятельного разряда.

В статье [275] авторы рассчитывают влияние электрического потенциала на формирование капель в программном пакете OpenFOAM. В данной работе электрогидродинамические эффекты просчитаны для ньютоновских жидкостей. Описывается моделирование ЭГД эффектов в сферической капле, которая находится между двух параллельных пластин с постоянным электрическим потенциалом между ними. Область заполнена ньютоновской вязкой жидкостью, имеющей такую же плотность, как и жидкость в капле. Из-за разности потенциалов между пластинами образуется электрическое поле, которое, в конечном итоге, ионизирует и поляризует поверхность капли, что приводит к деформации её внешней поверхности. Задача решается в осесимметричной постановке. Ось симметрии перпендикулярна плоскости пластин и проходит через центр капли. Расстояние между пластинами – 0,1м, изначальный диаметр капли 0,005м. Количество контрольных объемов варьировалось от 16000 до 20000 элементов, при этом результаты моделирования получались очень похожими. Во всех вычислениях наблюдаются продольные и поперечные деформации в капле. Полученные результаты конечно-элементного моделирования сравниваются с аналитическим решением Тейлора уравнений Навье-Стокса. [277]. Характер полученных данных согласуется с результатами, полученными другими авторами.

В работе [300] описывается исследование, посвященное численному моделированию капли между двумя пластинами. В отличие от работы [275], строится полная, объемная модель. Электрическое поле описывается с помощью уравнения Пуассона.

Движение жидкости описывается с помощью классических уравнений Навье-Стокса. Считается, что деформации носят симметричный характер. Область моделирования представляет собой куб со стороной $6R$, где R – начальный радиус капли, равный 0,18мм. Сначала решается задача с одной каплей. Как известно из [276] сферическая капля диэлектрической жидкости,

находящаяся в другой диэлектрической жидкости, под воздействием электрического поля, под действием деформации превращается в эллипсоид. Для разных фаз берется разный коэффициент диэлектрической проницаемости. Проводится исследование зависимости сходимости решения по величине деформации от размера сетки. Выбран размер элемента равный 0,011мм. Результаты численного решения очень хорошо согласуются с теорией для чисто диэлектрической капли. Во второй части работы исследуется взаимодействие четырех таких капель, расположенных симметрично в области размером $l \times l \times l/2$, где $l=6R$, в результате взаимодействия жидкостей в электрическом поле четыре капли сливаются в одну. Делая вывод, что с помощью электрических полей можно управлять движением диэлектрической жидкости, авторы предлагают использовать ЭГД метод при формировании микро и нано структур из диэлектрических материалов.

В [277] описывается взаимодействие двух диэлектрических жидкостей друг с другом. Задача решается методом объема жидкости (VOF – volume of fluid method). Автор замечает, что во всех подобных задачах при моделировании считается, что жидкость является абсолютным диэлектриком, поскольку силы, возникающие при данном взаимодействии надо учитывать при решении уравнений Навье-Стокса. Как и в предыдущей работе решается задача о капле диэлектрической жидкости в области другой диэлектрической жидкости. Авторы адаптируют свое программное обеспечение (Gerris) под решение конкретной задачи путем варьирования как параметров, связанных с физическими свойствами (коэффициент диэлектрической проницаемости, коэффициент поверхностного натяжения) так и параметры, связанные с численным моделированием (размер расчетной сетки, шаг по времени). В итоге при решении типичной модельной задачи [276] авторы получают очень хорошее согласование с теорией. Предложенный метод наиболее точно описывает переходные процессы на границе раздела фаз. Стоит отметить, что данный программный продукт имеет открытый код, который корректировали авторы статьи.

Также к классу задач, посвященному расчётам течения жидкости или газа через проводящий элемент стоит отнести статьи [278]. В [279] работе описывается численное исследование взаимодействия между электростатическим полем и потоком жидкости в системе двух непараллельных пластин электродов. Длина пластин – 120мм (длина расчетной области), длина электрода на пластине 60мм, расстояние между пластинами – 13,7-26,3мм. Основные уравнения: уравнение Пуассона для электрического поля, уравнение неразрывности для переноса заряда и уравнения движения для потока газа были решены с помощью метода конечных элементов при условии, весьма неоднородной структуры расчетной сетки. Главным итогом этого исследования является определение параметров скорости и давления и нахождение зависимости этих параметров от величины напряжения между электродами. Численные результаты показывают, что более высокое напряжение приводит к большей скорости и высокому давлению, в котором скорость газа является линейной, но давление не является линейной функцией от подаваемого напряжения. Было также обнаружено, что существует оптимальный угол наклона боковых стенок, для которых скорость потока воздуха на выходе из насоса достигает максимального значения.

Проанализировав вышеперечисленные статьи можно сделать вывод, что благодаря высоким расчетным мощностям, в наше время, при моделировании ЭГД процессов в различных каналах течения можно достичь достаточной точности для решения различного рода инженерных задач. Однако стоит отметить, что в большинстве работ для подтверждения решения авторы приводили пример модельной задачи и сравнивали её с экспериментом. Также, надо заметить, что точность решения задачи напрямую зависит от качества расчетной сетки, примененной в каждом отдельном случае.

Как было отмечено выше, сообщение электрического заряда выходящей из топливной форсунки жидкости может быть весьма эффективным средством для улучшения качества распыла. Данный способ управления распылом является достаточно привлекательным, и на сегодняшний день проводятся экспериментальные и теоретические исследования электрогидродинамического

взаимодействия заряженной струи с электрическим полем [96, 99, 100]. Показано, что с хорошей степенью точности динамику зараженной струи можно предсказать при помощи численного моделирования [283]. Для того, чтобы можно было рассчитывать распад выходящей из форсунки закрученной струи, необходимо тщательно проанализировать течение внутри форсунки.

Движение жидкости внутри топливной форсунки является частным случаем закрученных турбулентных течений. Для разработки математической модели необходимо провести анализ литературы по существующим на данный момент современным подходам к расчету такого рода течений, оценить их точность и применимость на основе сравнения с экспериментальными данными и по результатам определиться с выбором эффективной и экономичной модели.

Экспериментальные исследования закрученных потоков достаточно широко представлены в литературе, с некоторыми из них можно ознакомиться в статьях [284-286]. Анализируя профили скорости, стоит отметить тот факт, что, как для случая свободных закрученных струй [284, 286], так и для случая закрученных потоков, ограниченных стенками [285], профили усредненных значений сохраняют осевую симметрию на продолжительном расстоянии от входа в случае симметричного завихрителя, либо поток достаточно быстро выравнивается при отдалении от завихрителя. На основании этого можно сделать предположение, что достаточно ограничиться моделированием в осесимметричной постановке для получения корректного решения. Также известно (см., например, [289]), что течение на выходе из завихрителя является существенно турбулентным. Поэтому при выборе подхода к моделированию необходимо опираться на те предсказательные возможности, которые предоставляет та или иная модель турбулентности.

Наиболее полную и детальную картину течения можно получить, используя прямое численное моделирование, либо метод крупных вихрей [288, 289] для учета турбулентности в потоке. Однако эти подходы требуют подробной и однородной расчётной сетки, что является существенным ограничивающим фактором, а также они справедливы при расчете только трехмерных течений,

предполагают нестационарность процесса, а искомые величины получают при помощи усреднения за продолжительный временной интервал. Несмотря на то, что метод крупных вихрей более экономичен, в случае инженерных расчетов на сложных геометриях расчетных областей использование этих подходов нерационально и требует больших вычислительных ресурсов.

В силу затратности описанных выше методов исследователями активно применяется подход, основанный на уравнениях Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и дополненных двухпараметрической моделью турбулентности (см., например, [289-295]). Сравнения как с экспериментом [292,293], так и с результатами расчетов, полученных при помощи метода крупных вихрей [289], показали, что двухпараметрические модели адекватно описывают течения такого рода, с получением осесимметричной картины на начальном участке. В основном используются различные варианты k - ε модели, как наиболее распространенной и часто используемой в инженерных расчетах, однако в случае необходимости получения точного решения в области пограничного слоя, k - ω SST модель оказывается предпочтительнее [295].

Так как поток на продолжительном начальном участке является осесимметричным, как было указано ранее, исследователями проводился анализ возможностей численных схем и математических моделей для расчета течений с закруткой в осесимметричной постановке. По результатам сравнения с трехмерными расчетами и экспериментами было получено, что хотя вблизи оси симметрии двухпараметрические модели и дают некоторое расхождение с экспериментом [301], однако общая картина течения хорошо согласуется с результатами измерений [302,304].

Стоит отметить, что, как показано в статье [296], использование свободного программного продукта OpenFOAM позволяет получать качественные решения как в трехмерной, так и двумерной постановках.

На основании проделанного обзора можно заключить, что использование двухпараметрической модели турбулентности в осесимметричном приближении хоть и дает некоторое расхождение с экспериментом по радиальной скорости на

оси симметрии, однако полученное качественное решение вблизи стенок, а также корректное предсказание распределения осевой компоненты скорости может служить основанием для выбора такой модели и подхода в расчетах. Программное обеспечение OpenFOAM с открытым исходным кодом является хорошей альтернативой коммерческим решениям и позволяет получать точную и адекватную картину течения.

Для учета электрогидродинамического взаимодействия стандартным подходом является использование электростатического приближения (то есть пренебрежение индуцированными токами магнитным полем вследствие малости этих токов) для слабопроводящих сред [297,298], к которым относятся такие жидкие диэлектрики, как, например, топливо авиадвигателя. Такой подход является целесообразным и используется в настоящей работе для численного моделирования электрогидродинамических процессов в форсуночных модулях.

4.2 Численные исследования процессов переноса электрического заряда в модели электрокаплеструйного форсуночного модуля газотурбинного авиационного двигателя

4.2.1 Методология исследования

Объектом исследования являются процессы переноса заряда в модели форсуночного модуля авиационного двигателя при инжектировании ионов в системе электродов типа «игла — плоскость с отверстием». Под данным типом электродов будем в дальнейшем понимать электроды - заостренная по внутреннему диаметру шайба (электрод типа «игла») и другой плоский незаостренный электрод в виде шайбы (электрод типа «плоскость с отверстием») – см. рисунок 4.1.

Цель данных исследований — численное моделирование течения топлива (керосина) в форсунке турбореактивного авиационного двигателя для выработки рекомендаций по обеспечению максимального электрического заряда в

закрученном потоке топлива на выходе форсуночного модуля путём варьирования соответствующих гидродинамических, электрических и конструктивных параметров.

В работе автора [161] представлены возможности программного обеспечения в вычислительной среде «OpenFoam» и показано конкретное применение технологии динамического измельчения сетки в процессе выполнения численных расчетов процесса распыла жидкости в спутном воздушном потоке с верификацией экспериментом. Разделение струй – это сам по себе молекулярный процесс, и любой метод решения уравнений механики сплошной среды должен делать некоторые предположения, относящиеся к нему. Это, в частности, означает, что требования к размеру сетки очень жёсткие возле точки разделения, где размер сетки должен быть как минимум на порядок меньше, чем диаметр капли. С другой стороны, стандартный размер капли в распыляемых жидкостях – всего несколько микрон, тогда как топливная форсунка и сама исходная струя имеют миллиметровый масштаб, а канал впрыска ещё больше. Для численного моделирования это означает, что исследуемые явления происходят в очень широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Однако размер сетки нельзя сделать очень мелким повсюду, поскольку это слишком осложнит вычисления. Поэтому одна из возможностей преодолеть эту проблему – применение локального измельчения сетки, или адаптивного измельчения сетки (АИС). Однако при этом динамика системы меняется. Изменяются и свойства вычислительного пространства, изменяются диссипативные и волновые свойства применяемой конечно-разностной схемы. Поэтому, чтобы проверить, правильные ли результаты даёт вычислительный метод, например, правильное ли распределение капель по размеру, по-прежнему необходима экспериментальная проверка. При необходимости проводится настройка применяемого алгоритма применительно к исследуемому классу задач. В [161] показано, что размерность сеточной модели существенным образом влияет на получаемые результаты. Таким образом, при решении конкретной задачи электрогидродинамической задачи переноса электрического заряда

следует прежде всего проверить достаточность сеточной модели для описания исследуемого процесса. Также на результат численного моделирования влияет применяемая постановка по моделированию турбулентных пульсаций (выбор модели турбулентности). Последнее более подробно будет рассмотрено в 6 главе.

С помощью открытого пакета OpenFOAM проведено численное моделирование течения как без, так и с учётом электрогидродинамического взаимодействия. Выполнено трехмерное моделирование турбулентного течения в форсунке с учётом завихрителя (но без электрогидродинамики) с целью получения опорных данных при постановке входных граничных условий для осесимметричных расчётов без завихрителя (с учётом электрогидродинамики). Проведён численный расчёт течения в форсуночном модуле в осесимметричном приближении с учётом переноса заряда. Исследовано влияние варьирования геометрических параметров форсунки и входных граничных условия на процессы переноса заряда. По результатам работы выработаны соответствующие рекомендации.

В данном разделе приводятся результаты численного моделирования течения топлива в модели форсуночного модуля турбореактивного авиационного двигателя, которое проводилось для выработки рекомендаций по обеспечению максимального электрического заряда в закрученном потоке топлива на выходе электрокаплеструйной форсунки путём варьирования соответствующих гидродинамических, электрических и конструктивных параметров.

Процессы, происходящих при течении топлива в форсуночном модуле, определяют характеристики распыляемого форсункой топлива, что является одним из основных параметров для обеспечения качественного и полного сгорания топлива в камере сгорания турбореактивного авиационного двигателя. Для улучшения параметров распыла может применяться электрическое поле [1,2,138,280,305]. Одним из возможных способов влияния на процесс распыла топлива в турбореактивных двигателях является заряд жидкости, выходящей из топливной форсунки, при помощи электродов, расположенных непосредственно вблизи выхода из форсунки (рисунок 4.1). Поскольку для более

эффективного распыла топлива (которое происходит непосредственно после выхода топлива из форсунки) применяются завихрители, то поток, проходящий через электроды, является сильно закрученным, и его адекватное моделирование необходимо для анализа возможности использования электрического поля для управления распылом. Поэтому одной из задач также является анализ течения топлива в топливном авихрителе, в качестве которого в форсунке турбореактивных авиационных двигателей может использоваться как чисто аксиальный (осевой) или радиальный, так и завихрители смешанного типа. Структура течения в форсунке за завихрителем может сильно зависеть от типа и параметров завихрителя. Здесь в качестве исследуемого типа завихрителя был выбран аксиальный топливный завихритель.

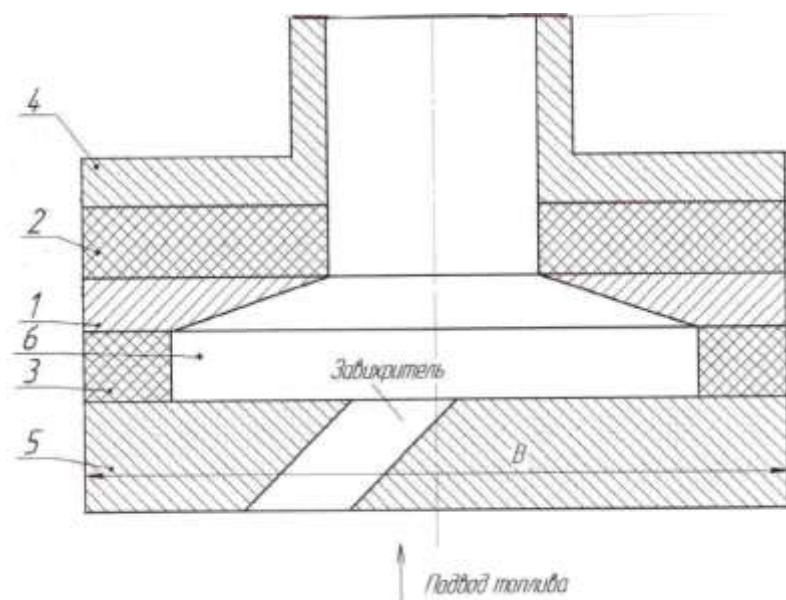


Рисунок 4.1 — Схема электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю:

1 — кольцевой игольчатый электрод, 2, 3 — изоляторы, 4 — электрод типа «плоскость», 5 — завихритель топлива, 6 — топливный канал

Для моделирования течения в разработанном форсуночном модуле (в том числе для проведения многопараметрических исследований) используется численный метод решения уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости (например, см.[168]). Поскольку характерные числа Рейнольдса течения в

форсунке, рассчитываемые как UL_0/ν , где U и L_0 — характерные скорость потока и размер канала, ν — кинематический коэффициент вязкости, составляют порядка 2000, а поток сильно закручен, то течение в форсунке является турбулентным, и для его описания необходимо использовать соответствующие подходы, которые в настоящее время представлены в достаточно большом количестве и отличаются степенью разрешения и точностью моделирования турбулентности.

В настоящей работе сформулированы математические модели и численные методы, базой для создания которых является открытый и свободный программный пакет OpenFOAM версии 2.3. Проанализированы результаты численного моделирования части форсуночного модуля вместе с топливным завихрителем для получения входных граничных условий для последующих многопараметрических расчетов (без моделирования течения в завихрителе). Представлены результаты многопараметрических исследований течения с учётом электрогидродинамических эффектов и даются рекомендации по обеспечению максимального электрического заряда в закрученном потоке топлива на выходе форсуночного модуля.

4.2.2 Математическая электрогидродинамическая модель и численный метод ее решения

4.2.2.1 Основные уравнения электрогидродинамических процессов переноса униполярного электрического заряда в форсуночных модулях

Уравнения электрогидродинамики для описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в изотермической несжимаемой жидкости (представляющей собой диэлектрик) могут быть записаны в следующем виде [88,297, 298, 1, 2, 15]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (4.1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho_e \vec{E}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \vec{V} + b \rho_e \vec{E} - D_\Sigma \nabla \rho_e) = 0, \quad (4.3)$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (4.4)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi. \quad (4.5)$$

Здесь введены следующие обозначения: \vec{V} — вектор скорости рабочей жидкости, ρ — массовая плотность рабочей жидкости, p — давление, $\boldsymbol{\tau}$ — тензор напряжений в жидкости (вязких и турбулентных), ρ_e — объёмная плотность электрического заряда, \vec{E} , ϕ — вектор напряжённости и потенциал электрического поля, b — подвижность ионов в рабочей жидкости, D_Σ — суммарный (ионный и турбулентный) коэффициент диффузии, ε — диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости, ε_0 — электрическая постоянная.

В качестве рабочей жидкости выбран керосин ТС-1.

Уравнение (4.1) представляет собой уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости, (4.2) — уравнение баланса импульса в жидкости. Соотношения (4.3), (4.4) и (4.5) являются уравнениями электростатики: (4.3) — закон сохранения заряда (уравнение Нернста-Планка), (4.4) — уравнение Пуассона для потенциала. В уравнении баланса импульса (4.2) не включён тензор максвелловских напряжений вследствие малости его влияния на течение жидкости.

Суммарный тензор напряжений $\boldsymbol{\tau}$ (включающий молекулярную и турбулентную составляющие) может быть записан, используя обобщённый закон Ньютона и (при использовании RANS подхода к моделированию турбулентности, как в настоящей работе) гипотезу Буссинеска для тензора турбулентных напряжений:

$$\tau = 2(\mu + \mu_t)\dot{S} - \frac{2}{3}\rho kI, \quad (4.6)$$

где μ_t — коэффициент турбулентной вязкости, I — тензорная единица, k — кинетическая энергия турбулентных пульсаций (слагаемое с k , называемое также турбулентным давлением, может быть опущено в силу малости, либо «присоединено» к обычному давлению, тогда в (4.2) под p понимается модифицированное давление). Тензор скоростей деформации \dot{S} по определению равен:

$$\dot{S} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{V} + (\nabla\vec{V})^T), \quad (4.7)$$

T — операция транспонирования.

Суммарный коэффициент диффузии D_Σ , входящий в уравнение (4.3), вычисляется как сумма ионного коэффициента диффузии D_i и турбулентного:

$$D_\Sigma = D_i + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}. \quad (4.8)$$

В уравнение (4.8) введено так называемое турбулентное число Шмидта Sc_t , значение которого для ионов в турбулентном потоке выбирается исходя из аналогии между турбулентным переносом ионов в жидкости и турбулентным переносом примеси, для которого типичные значения турбулентного числа Шмидта лежат в диапазоне $0.4 \div 1.3$ [261, 306]. В настоящей работе для турбулентного переноса униполярных ионов в формуле (4.8) использовались значения числа Шмидта $Sc_t = 0,9$, поскольку, как показывают дополнительные исследования на основе прямого численного моделирования течения топлива с учётом электрогидродинамических эффектов, это значение обеспечивает приемлемую точность решения.

Для замыкания приведённой выше системы уравнений необходимо сформулировать граничные условия и модель турбулентности.

Что касается граничных условий, то для гидродинамики они стандартные (на входе задаётся входной поток, на выходе — фиксированное давление, на

стенках ставится условие прилипания). Для границ области, представляющей собой электроды, задаётся разность электрических потенциалов.

Особое внимание необходимо уделить вопросу появления униполярных ионов в потоке керосина вблизи игольчатого электрода в резко неоднородном электрическом поле.

В литературе по электрогидродинамике, как уже отмечалось выше, обычно рассматриваются две модели образования ионов в потоке жидкости: инъекционная и объёмно-диссоциационная [262, 263]. В первой модели причиной появления объёмного заряда в жидкости считается инъекция заряда с поверхности игольчатого электрода, во второй — объёмная диссоциация вблизи игольчатого электрода, причём диссоциация может быть нескольких типов: термическая и высоковольтная (эффект Вина), возникающая в областях повышенной напряженности электрического поля. В случае слабопроводящей жидкости (какой является углеводородное топливо – керосин) термической диссоциацией можно пренебречь по сравнению с инъекционным механизмом ионообразования. Что касается эффекта Вина, возникающем в случае высоких напряжений, то в настоящее время этот механизм является малоизученным [263], и считается, что в целом вклад объёмной диссоциации обычно ниже, чем за счёт инъекции с поверхности электрода.

Поэтому в настоящей работе, как уже отмечалось, рассматривается только инъекционная модель (см. [263, 1, 2]).

В настоящем исследовании прежде всего рассматривается вопрос о влиянии параметров закрученного потока керосина на перенос заряда в предположении о неизменности процесса ионообразования при изменении параметров потока. Также считается, что вблизи игольчатого электрода образуются униполярные ионы только одного знака – знака электрического потенциала игольчатого электрода, причём их концентрация настолько мала, что влиянием ионов на физические свойства рабочей жидкости можно пренебречь. Таким образом, предполагается, что все физические и электрические свойства рабочей среды постоянны.

В качестве модели образования ионов у поверхности игольчатого электрода используется инжекционная модель, подробно рассмотренная в п. 2.4.2 настоящей диссертации (см. выражения (2.32), (2.33) с уточненными коэффициентами).

Что касается граничного условия для зарядов на электроде типа «плоскость с отверстием», то считается, что все ионы, попадающие на электрод, нейтрализуются. Таким образом, на данной границе ставится следующее граничное условие на плотность тока нейтрализуемых ионов j_{loss} [1,2,263]:

$$j_{loss} = b\rho_e E_n - D_i \frac{\partial \rho_e}{\partial n}, \quad (4.9)$$

где E_n — проекция напряжённости электрического поля на нормаль к поверхности электрода.

Для замыкания приведённой выше системы уравнений (4.1) — (4.5) необходимо записать уравнения для определения турбулентной вязкости μ_t . В настоящей работе использовалась модель турбулентности k - ω SST Ментера [307], в которой для определения μ_t вводятся два уравнения переноса: кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации ω :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k - (\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k) = \tilde{P}_k - \rho \beta^* \omega k. \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega) = \frac{\rho \gamma}{\mu_t} P_k - \rho \beta \omega^2 + (1 - F_1) \sigma_d \rho D_{k\omega}. \quad (4.11)$$

Турбулентная вязкость рассчитывается по формуле:

$$\mu_t = \frac{0.31k}{\max(0.31\omega, SF_2)}$$

Замыкающие соотношения для приведённых выше уравнений записываются следующим образом:

$$S = \sqrt{2\dot{S}^2}, F_2 = \tanh(\arg_2^2), \arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09d\omega}, \frac{500\nu}{d^2\omega}\right)$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09d\omega}, \frac{500\nu}{d^2\omega} \right), \frac{2k}{\tilde{D}_{k\omega}d^2} \right]$$

$$\tilde{D}_{k\omega} = \max(D_{k\omega}, 10^{-20}), D_{k\omega} = \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\omega}$$

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho k \omega), P_k = 2\mu_t \dot{S}^2$$

Величина d представляет собой расстояние от ближайшей стенки форсуночного модуля. Величины σ_k , σ_ω и β рассчитываются по следующей интерполяционной формуле:

$$\phi = F_1\phi_1 + (1 - F_1)\phi_2, \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta\}.$$

Константы модели определяются следующим образом:

$$\sigma_{k1} = 0.85 \quad \sigma_{\omega1} = 0.5 \quad \beta_1 = 0.075$$

$$\sigma_{k2} = 1.0 \quad \sigma_{\omega2} = 0.856 \quad \beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = 0.09 \quad \sigma_d = 2\sigma_{\omega2} \quad \gamma = \beta/\beta^* - \sigma_\omega \kappa^2 / \sqrt{\beta^*}$$

$$\kappa = 0.41$$

Для системы уравнений (4.10) — (4.11) на стенке задаются следующие граничные условия (d_1 — расстояние от стенки до первого пристенного узла расчётной сетки):

$$k_w = 0, \omega_w = \frac{800\mu}{\rho d_1^2}.$$

Необходимо отметить, что такие граничные условия справедливы лишь для так называемых низкорейнольдсовых расчётных сеток, когда значение безразмерного расстояния от стенки до первого пристенного узла сетки y_1^+ меньше 1. Здесь y^+ определяется по формуле:

$$y^+ = \frac{d\sqrt{\rho\tau_w}}{\mu},$$

где τ_w — модуль напряжения трения на стенке.

Известно [308], что эффекты, возникающие в турбулентном течении с искривлёнными линиями тока (например, в закрученном потоке топлива) могут

оказывать сильное влияние на структуру турбулентности. Для более адекватного описания таких течений в рамках RANS-подхода в работах [310,187] предложено использовать поправку на кривизну линий тока, которую необходимо добавить в соответствующие уравнения для турбулентных характеристик. Для модели SST данная поправка вводится следующим образом [309]: генерационные члены \tilde{P}_k и P_k в уравнениях (4.10) и (4.11) умножаются на величину f_{r1} , определяемую как

$$f_{r1} = \max[\min(f_{rot}, 1.25), 0],$$

где

$$f_{rot} = (1 + c_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} [1 - c_{r3} \arctg(c_{r2} \hat{r})] - c_{r1},$$

$$r^* = S / |\Omega|,$$

$$\hat{r} = \frac{2\Omega_{ik} \dot{S}_{jk}}{|\Omega| D^3} \left(\frac{\partial \dot{S}_{ij}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \dot{S}_{ij} \right),$$

$$D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2).$$

Здесь, как и ранее, \dot{S} - тензор скоростей деформации, \dot{S}_{ij} - его компоненты, $S = \sqrt{2\dot{S}^2}$. Символом Ω_{ij} обозначены компоненты тензора завихренности:

$$\Omega = \frac{1}{2} (\nabla \vec{V} - (\nabla \vec{V})^T), |\Omega| = \sqrt{2\Omega^2}.$$

В вышеприведённых формулах подразумевается суммирование по повторяющемуся индексу. Константы модели:

$$c_{r1} = 1.0, c_{r2} = 2.0, c_{r3} = 1.0.$$

4.2.2.2 Численный метод анализа электрогидродинамических процессов переноса униполярного электрического заряда в форсуночных модулях

Для численного решения системы уравнений ((4.1) — (4.11)) в настоящей работе использовался открытый и свободный программный пакет OpenFOAM

версии 2.3 (англ. Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox). Код OpenFOAM в основном разрабатывается в Великобритании в компании OpenCFD Ltd, но также важный вклад в разработку вносит мировое научное сообщество [183]. Это свободно распространяемый инструментарий вычислительной гидродинамики для операций с полями, скалярными, векторными и тензорными величинами. На сегодняшний день является одним из самых широко используемых приложений, предназначенных для исследовательских расчетов при помощи метода контрольных объемов (рисунок 4.2).

В методе контрольного объема используются интегральные уравнения сохранения. Например, уравнение переноса заряда 4.3 в интегральной форме записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho_e d\Omega + \int_S (\rho_e \vec{V} + b\rho_e \vec{E} - D_{\Sigma} \nabla \rho_e) \cdot \vec{n} dS = 0, \quad (4.12)$$

где Ω — объем контрольного объёма, S — площадь поверхности контрольного объёма, $d\Omega$ и dS — элементарный объем и элемент площади поверхности контрольного объема, соответственно.

Введя расчетную сетку, можно провести дискретизацию уравнения (4.12) для каждого контрольного объема, которая даёт:

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \Omega + \sum_f (\rho_e \vec{V} + b\rho_e \vec{E} - D_{\Sigma} \nabla \rho_e)_f \cdot \vec{S}_f = 0,$$

где суммирование по f означает суммирование по всем граням контрольного объёма, f — индекс грани, S_f — площадь грани (соответствующий вектор — площадь грани, умноженная на нормаль к грани).

Дискретные значения величин присваиваются центрам ячеек C_0 и C_1 , а на грани S_f значения получают путем интерполяции либо по центральной схеме для диффузионных слагаемых, либо по противопоточной для конвективных.

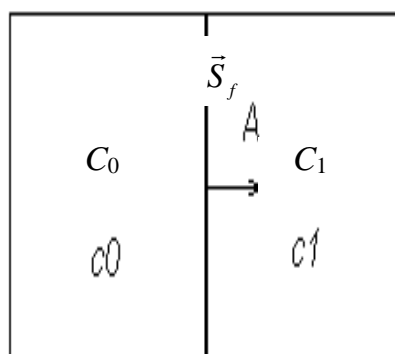


Рисунок 4.2 — Контрольный объем, используемый для иллюстрации дискретизации уравнения переноса электрического заряда в форсуночных модулях

В результате дискретизации по методу контрольного объема получается система дискретных нелинейных уравнений, которая линейризуется для нахождения системы уравнений от искомых величин (полей давлений, скоростей, потоков масс через грани ячейки для жидкости и газа, плотности объёмного заряда и т.д.) в каждой ячейке расчетной сетки. При этом применяется неявный способ линейризации, полученная система линейных алгебраических уравнений решается итерационными методами (биспоряженных градиентов или алгебраическим многосеточным).

Уравнение сохранения массы (4.1) используется для определения давления.

Описанный выше метод контрольного объема реализован в пакете OpenFOAM.

OpenFOAM предлагает большое количество решателей, которые объединены в классы по типам решаемых задач. В настоящей работе использовались следующие доработанные для решения задач электрогидродинамики решатели: *simpleFoam* и *pisoFoam*. Первый предназначен для решения стационарных задач турбулентного течения несжимаемой жидкости

методом SIMPLE [311], второй — для решения нестационарных задач методом PISO [312].

Вычислительная среда OpenFOAM предоставляет возможность модифицировать существующие солверы и создавать собственные без необходимости существенной переработки кода. Для введения новых переменных и уравнений в частных производных используется специальный мета-язык OpenFOAM, на котором записываются эти уравнения, являющегося «надстройкой» над языком программирования C++. В частности, уравнения переноса электрического заряда (4.3) в OpenFOAM записывается в следующем виде:

```
solve  
( fvm::ddt(q)  
  + fvm::div(phi, q)  
  + fvm::div(qFlux, q)  
  - fvm::laplacian(Di + mut/Sct/rho, q));
```

Класс `fvm` означает, что аппроксимация последующего оператора производится по неявной схеме (в отличие от класса `fvc`, который предназначен для явного вычисления оператора). Соответствие операторов OpenFOAM и математических вполне ясно следует из примера, но, тем не менее, приведены ниже в таблице 4.1.

Поскольку для пространственной дискретизации в OpenFOAM используется метод конечного объёма, оператор дивергенции дискретизируется методом Грина-Гаусса с записью потока на грани расчётной ячейки, т. е., например, $\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{S}_f$ представляет собой величину $\vec{V}_f \cdot \vec{S}_f$, где \vec{S}_f — вектор грани расчётной ячейки (т. е. Вектор нормали к грани, умноженный на площадь грани).

Таблица 4.3 — Математические операторы в OpenFOAM

Математический оператор	Запись на мета-языке OpenFOAM
$\frac{\partial}{\partial t}$	Ddt
$\nabla \cdot (\vec{V} \rho_e)$	div(phi, q)
$\nabla \cdot (b \vec{E} \rho_e)$	div(qFlux, q)
$\nabla \cdot \left[\left(D_i + \frac{\mu}{\rho S c_t} \right) \nabla \rho_e \right]$	laplacian(Di+mut/Sct/rho, q)

Тогда $\nabla \cdot (\vec{V} \rho_e)$ дискретизируется по методу конечного объема следующим образом:

$$\nabla \cdot (\vec{V} \rho_e) \approx \frac{1}{\Omega} \sum_f \rho_{ef} \vec{V}_f \cdot \vec{S}_f, \quad (4.13)$$

где Ω — объём расчётной ячейки, индекс f означает, что значение переменных берётся на грани расчётной ячейки.

Порядок пространственной аппроксимации по формуле 4.13 зависит от способа вычисления значений переменных на грани и может быть как первым, так и вторым.

В OpenFOAM для пространственных операторов могут использоваться разные схемы интерполяции на грань расчётной ячейки. В настоящей работе использовались следующие: схема *upwind*, являющаяся противопоточной схемой первого порядка точности, и схема *SFCD*, которая в случае достаточно гладкого поля аналогична центральной разностной схеме второго порядка точности и может переключаться на схему первого порядка в случае возможного развития нефизических осцилляций.

Схема *upwind* используется для всех уравнений, за исключением уравнения баланса импульса, для которого используется схема *SFCD*. Аппроксимация

оператора Лапласа во всех уравнениях выполняется по центральной схеме второго порядка с введением поправки на скошенность ячеек.

Временная производная (в случае решения нестационарной задачи) аппроксимировалась со вторым порядком точности по схеме *backward* (расчёт производной по значениям на текущем временном слое и двух предыдущих).

Как было отмечено ранее, существующие решатели в OpenFOAM *были доработаны для возможности учёта электрогидродинамических эффектов*. Помимо этого, для модели турбулентности $k-\omega$ SST была добавлена возможность использовать поправку на кривизну линий тока, описанную подробно в предыдущем разделе. Также для задания потока инжектируемых ионов по формуле 2.33 использовалась библиотека расширений OpenFOAM, имеющая название `swak4foam`.

В используемом подходе к моделированию течения топлива для получения решения системы дискретных линейаризованных уравнений сохранения массы и импульса, используется итерационная процедура, блок схема которой показана на рисунке 4.3. При этом последовательно выполняются следующие вычисления:

- 1) Подготавливаются параметры течения (используется предыдущий шаг по времени). Если расчет только начинается, то параметры берутся в соответствии с начальными данными.

- 2) С использованием текущих значений потоков массы и давления вычисляются предварительные значения составляющих скоростей.

- 3) Скорости, найденные в п. 2, могут локально не удовлетворять уравнению неразрывности. Поэтому используется итерационный алгоритм для поправки давления, полученного из уравнения сохранения массы и линейаризованного уравнения сохранения импульса. С её помощью ищутся поправки скорости и потоков массы рабочей жидкости (керосине) для обеспечения неразрывности.

- 4) С помощью найденных полей скорости, давления и потоков массы рассчитываются новые значения скалярных величин среды.

- 5) Проверяется, удовлетворяет ли полученное решение условиям сходимости.

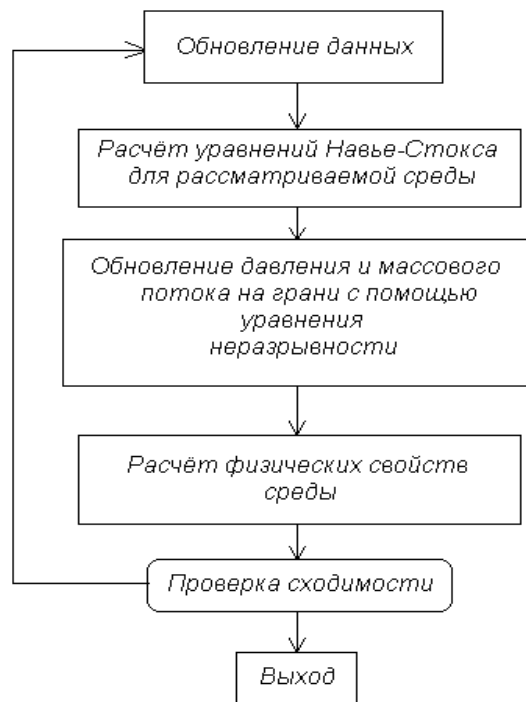


Рисунок 4.3 — Блок-схема численного расчета процессов движения топлива в электрокаплеструйном форсуночном модуле

В качестве сеткопостроителя использовался открытый программный пакет SALOME версии 7.4, позволяющий строить неструктурированные сетки со сложной топологией расчётной области. Для обработки результатов расчёта использовались открытый пакет ParaView 4.1 и программа для построения графиков gnuplot 4.6.

4.3 Моделирование течения топлива через завихритель форсуночного модуля турбореактивного авиационного двигателя

4.3.1 Постановка задачи

Для того чтобы проводить параметрические расчёты течения топлива в форсунке с учетом электрогидродинамических эффектов, наиболее целесообразно использовать упрощённую постановку задачи без завихрителя в осесимметричном приближении, а наличие завихрителя учитывать путем постановки специальных входных граничных условий. Однако для адекватного

задания граничного условия для такой упрощённой задачи необходимо оценить параметры потока за завихрителем для геометрии завихрителя, приближенной к реальной. Для этого был проведён дополнительный трехмерный расчёт течения топлива в части форсуночного модуля с учётом топливного завихрителя (без электрического поля), результаты которого (представленные в данном разделе) использовались в качестве «опорных» данных при проведении многовариантных расчетов течения с учетом электрического поля [1,2,15].

Параметры форсунки и топливного завихрителя задавались на основе имеющихся данных для реальных форсунок турбореактивного авиационного двигателя. Параметры течения в расчете соответствовали натурным экспериментам, в качестве топлива использовался авиационный керосин ТС-1, расход через форсунку (форсуночный модуль) был фиксирован и равен 40 л/час [18].

На рисунке 4.4 приведена геометрия расчётной области, представляющей собой 120-градусный сектор, вырезанный вдоль оси форсуночного модуля.

Поток топлива (керосина) течёт слева направо. Паз аксиального топливного завихрителя, обозначенный на рисунке цифрой 2, представляет собой канал между входной областью, обозначенной цифрой 1, и основным каналом форсунки, обозначенным цифрой 3 (в нём располагаются электроды форсуночного модуля). Пазы топливного завихрителя расположены таким образом, что выходящий из них поток топлива направлен под углом к оси форсуночного модуля, таким образом, получается закрученный поток топлива.

Для моделирования течения в данной геометрии использовалась неструктурированная тетраэдральная сетка. Поскольку данный расчёт предназначен в первую очередь для получения параметров закрутки потока на выходе из завихрителя, в пазе завихрителя сетка довольно грубая и недостаточная для разрешения возникающих турбулентных пограничных слоёв, поэтому при моделировании турбулентного течения по методу RANS на стенках использовались пристенные функции.

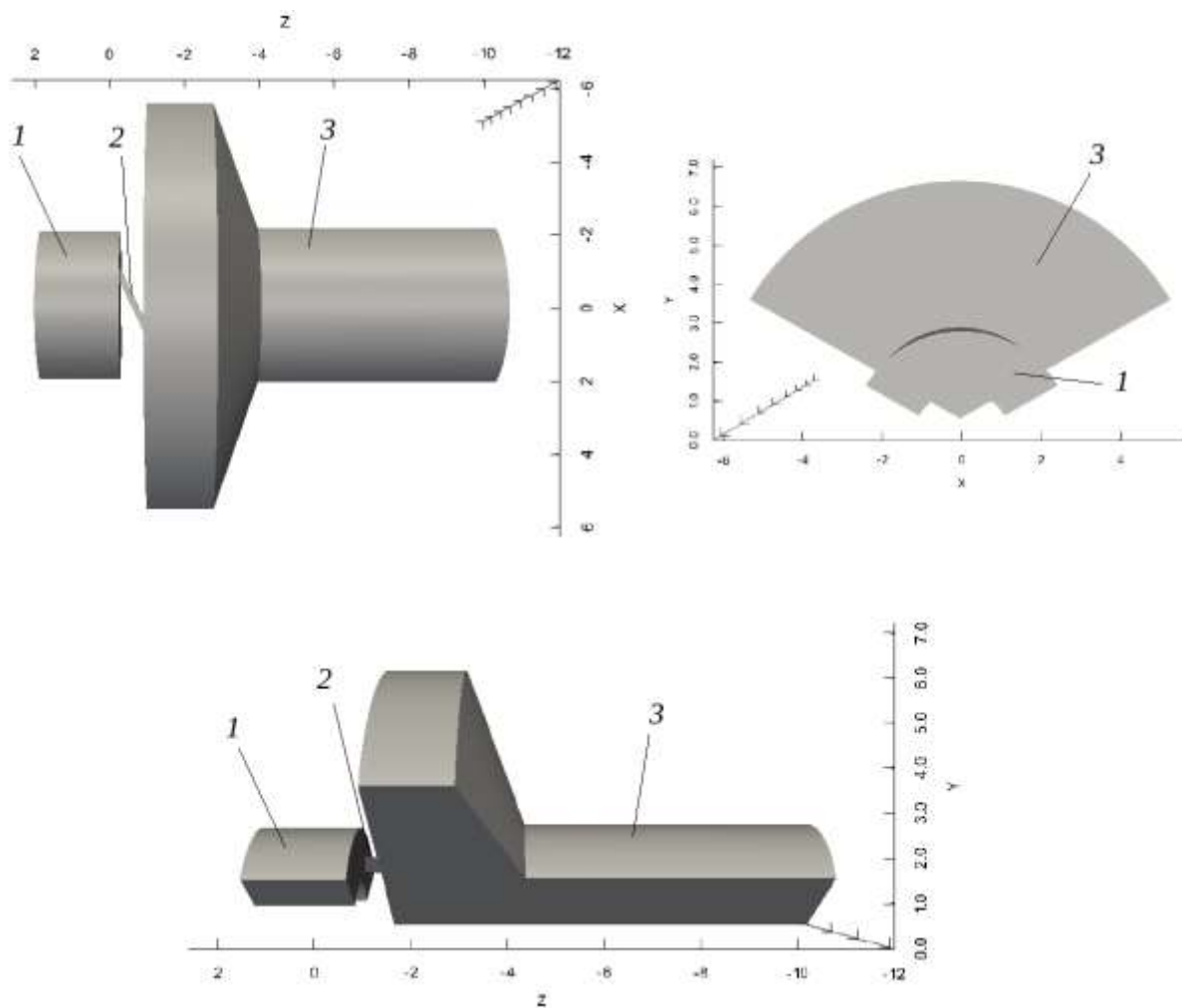


Рисунок 4.4 — Геометрия расчётной области (размеры указаны в миллиметрах).

Цифрами обозначены: 1 — входной участок перед завихрителем, 2 — паз завихрителя, 3 — основной канал форсунки

Фрагменты используемой расчётной сетки представлены на рисунке 4.5. На поверхностях расчетная сетка треугольная, внутри объёма — тетраэдральная. Общее число ячеек расчётной сетки составляет порядка 300000.

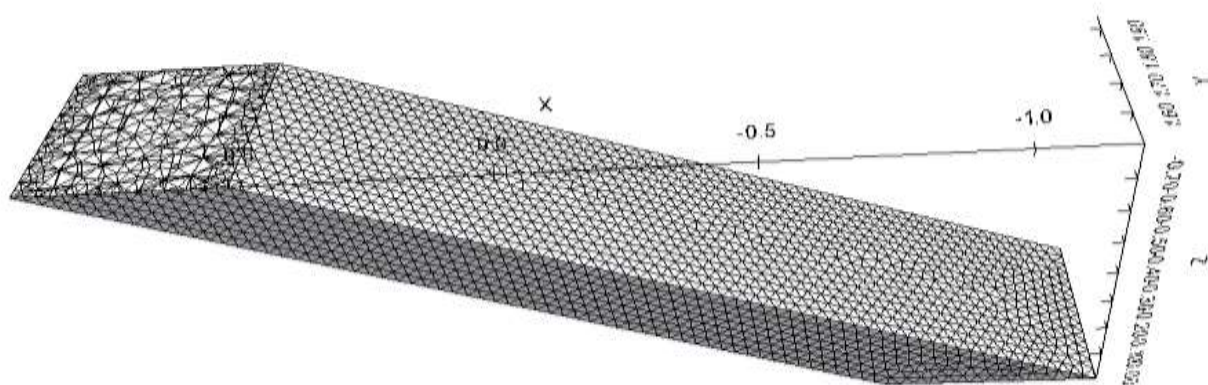
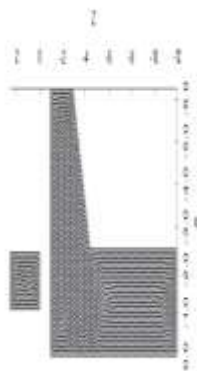


Рисунок 4.5 — Расчётная сетка: сверху — входная область и основной канал (сетка на плоскости периодичности), внизу — паз топливного завихрителя (размеры указаны в миллиметрах)

Граничные условия задаются следующим образом. На входе в расчётную область (левая граница области 1 на рисунке 4.4) задаётся однородный поток топлива со скоростью 0.5656 м/с (такая скорость соответствует объёмному расходу 40 л/час). Степень турбулентности потока топлива, рассчитываемая как $\sqrt{2k/(3U)}$ (k — кинетическая энергия турбулентных пульсаций, U — скорость потока), на входе составляет порядка 3%. На выходе (правая граница области 3 на рисунке 4.4) задаётся постоянное давление. На двух осевых поверхностях при углах $\pm 60^\circ$ задаются условия периодичности (таким образом, предполагается, что в топливном завихрителе имеется 3 симметричных паз). Свойства рабочей

жидкости соответствуют свойствам керосина ТС-1: плотность $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$, коэффициент динамической вязкости $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

4.3.2 Результаты численных расчетов течения керосина ТС-1 в электрокаплеструйном форсуночном модуле применительно к турбореактивному авиационному двигателю

Были проведены расчеты в нестационарной постановке по методу RANS с использованием $k-\omega$ SST модели турбулентности [1,2,15].

На рисунке 4.6 представлены значения компонент скорости потока топлива (керосин ТС-1) в точках мониторинга в зависимости от времени для установившегося течения. Точки мониторинга имеют следующие координаты (x ; y ; z): 1 — непосредственно перед входом в паз топливного завихрителя (0; 2 мм; 0), 2 — в основном канале за топливным завихрителем (0; 1 мм; -2 мм), 3 — недалеко от выхода из расчётной области (0; 1.5 мм; -10 мм).

Из рисунка 4.6 можно сделать вывод о существенной нестационарности потока топлива в форсуночном модуле. Кроме того, видно, что окружная компонента скорости (которая в представленных точках мониторинга совпадает с компонентой скорости V_x) превышает расходную компоненту (V_z) в несколько раз, что говорит о большой степени закрутки потока. Перед завихрителем течение практически стационарное.

Мгновенные распределения скорости представлены на рисунке 4.7. Наибольшая скорость течения развивается в пазе топливного завихрителя, после выхода из паза поток быстро тормозится.

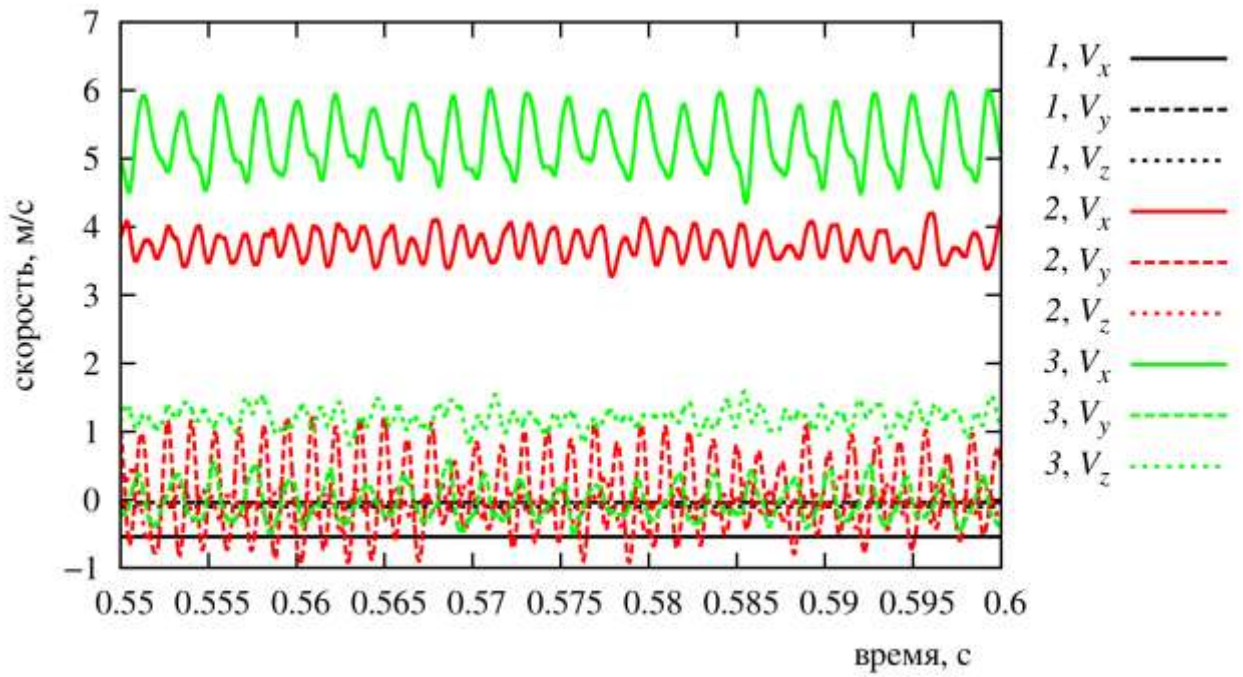


Рисунок 4.6 — Скорость потока керосина ТС-1 в точках мониторинга

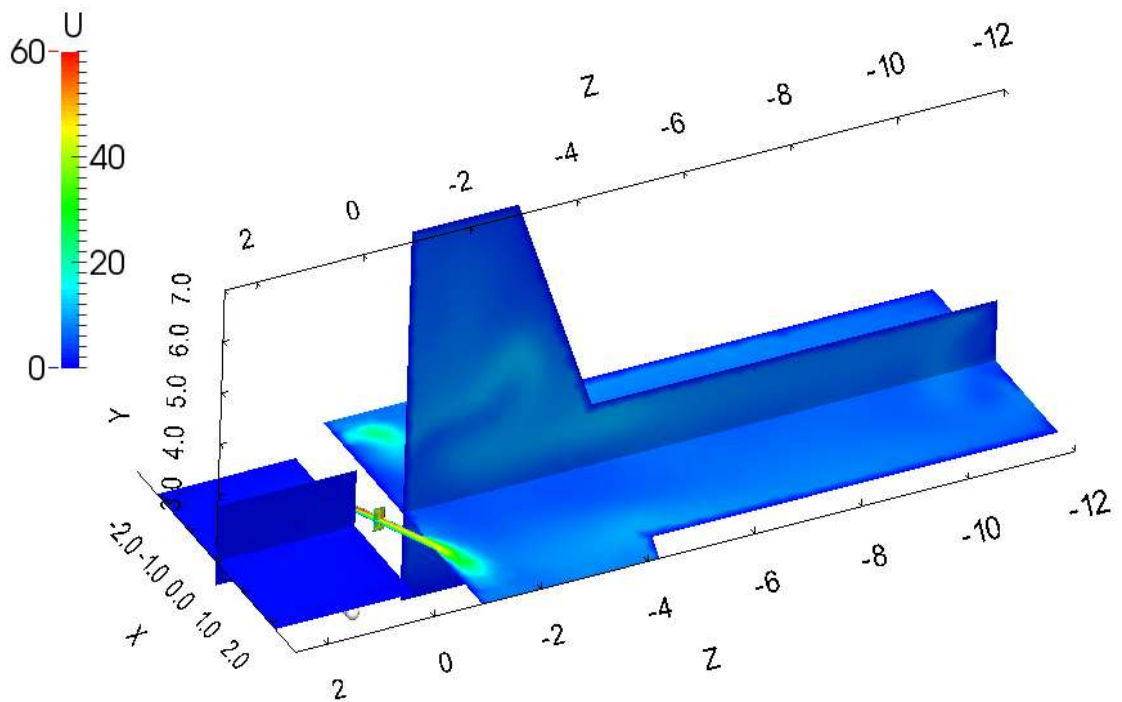


Рисунок 4.7 — Модуль скорости потока керосина ТС-1 в сечениях $X = 0$ и $Y = 1.7$ мм в электрокапеструйном форсуночном модуле турбореактивного авиадвигателя (размеры на рисунке указаны в миллиметрах)

На рисунке 4.7 в сечении $X = 0$ в основном канале форсунки показаны распределение давления (отнесённого к плотности топлива) и вектора скорости топлива. Здесь отчётливо видно, что течение во всём канале является закрученным, причём параметр закрутки, рассчитываемый как отношение V_φ/V_z (V_φ — азимутальная компонента скорости в плоскости XU), весьма велик.

На рисунке 4.6 приведены распределения отношения давления к плотности керосина и вектора скорости потока керосина в основном канале форсунки в осевом сечении $X = 0$

Поскольку течение является существенно нестационарным, было проведено осреднение решения по времени, причём интервал осреднения выбирался достаточно большим (более 0,2 с). На рисунке 4.9 приведены поля кинематического коэффициента турбулентной вязкости $\nu_t = \mu_t/\rho$, осреднённого во времени. Видно, что в ядре потока топлива непосредственно за топливным завихрителем турбулентная вязкость достигает значений примерно в 100 раз больше, чем молекулярная вязкость, однако ниже по течению турбулентная вязкость уменьшается.

Осреднённое по времени решение не является полностью осесимметричным, и для того, чтобы использовать результаты этого решения для постановки задачи в осесимметричном приближении, необходимо провести также осреднение в азимутальном направлении. Предположение о возможности описывать данное течение в осесимметричном приближении является вполне обоснованным, поскольку, как следует из настоящего расчета, параметры потока топлива выравниваются в азимутальном направлении при удалении от завихрителя вниз по потоку. Для иллюстрации этого факта на рисунке 4.10 приведены поля компоненты скорости V_z в поперечных (к оси Z) сечениях. Видно, что начиная с сечения $Z = -3$ мм вниз по потоку течение уже довольно равномерное в азимутальном направлении, а начиная с $Z = -5$ мм — осесимметричное.

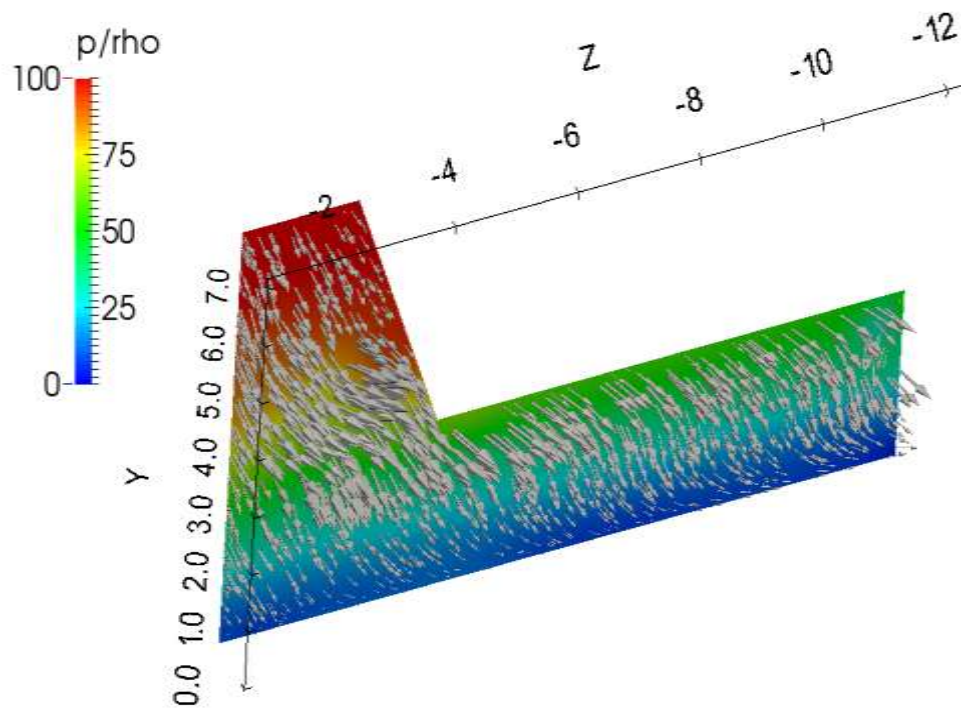


Рисунок 4.8 — Отношение давления к плотности керосина и вектора скорости в основном канале форсуночного модуля в осевом сечении $X = 0$

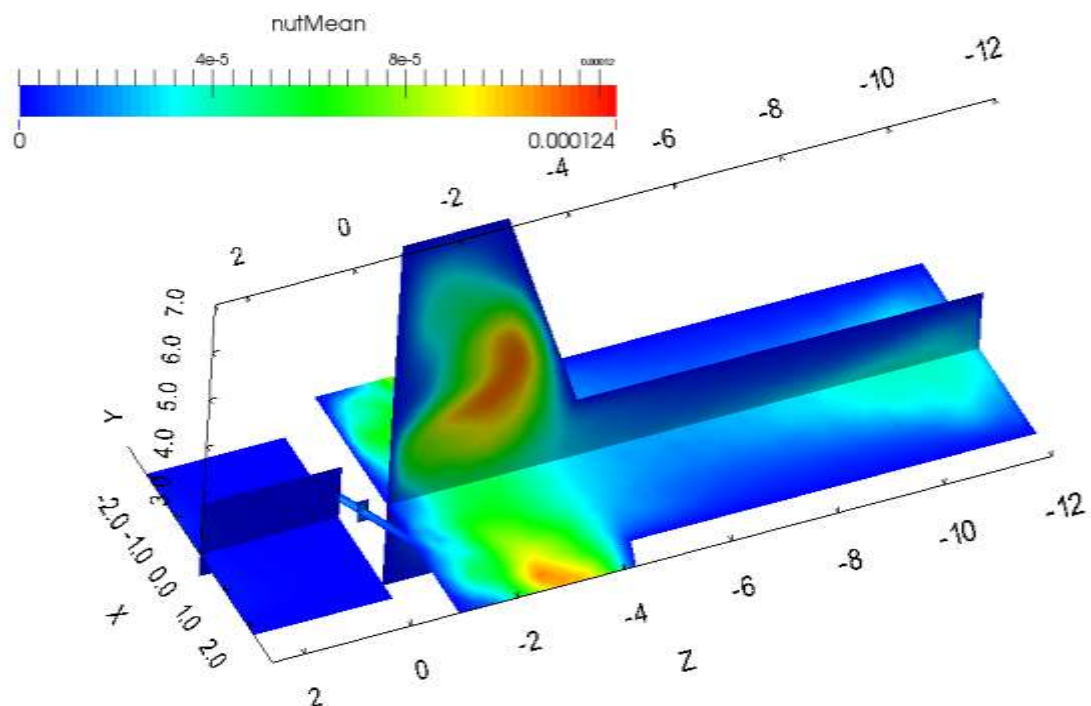


Рисунок 4.9 — Осреднённое по времени значение кинематического коэффициента турбулентной вязкости в сечениях $X = 0$ и $Y = 1.7$ мм

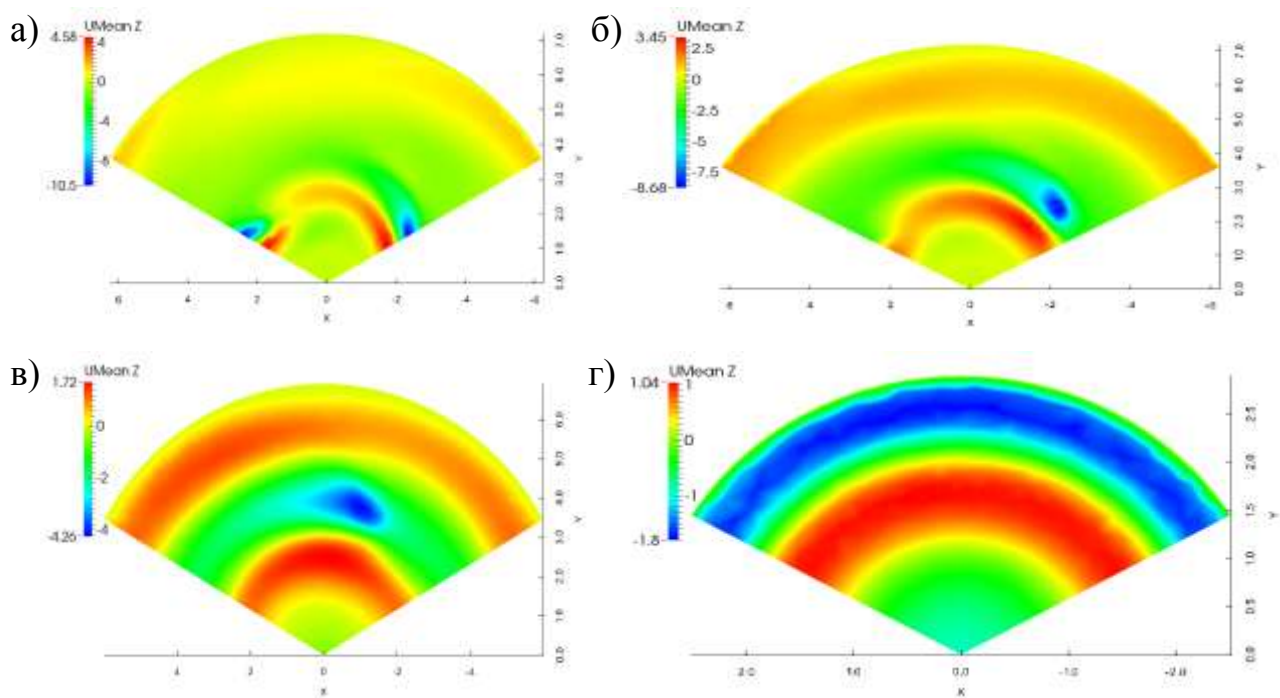


Рисунок 4.10 — Осреднённая по времени компонента скорости V_z керосина ТС-1 в сечениях: а) $Z = -1.5$ мм; б) $Z = -2$ мм; в) $Z = -3$ мм; г) $Z = -5$ мм

Осреднение в азимутальном направлении было проведено с помощью пакета ParaView. Результаты приведены на рисунке 4.11, где показаны распределения модуля скорости и осевой компоненты скорости.

Из полученного осреднённого по времени и в азимутальном направлении решения далее необходимо вырезать профили скорости (и других характеристик потока) непосредственно за топливным завихрителем для использования их в качестве опорных при постановке входных граничных условий в осесимметричных параметрических расчётах с учётом электрогидродинамических эффектов. Сечение, из которого брались профили величин, находится непосредственно за топливным завихрителем на расстоянии примерно 0.06 мм от выхода из паза топливного завихрителя. На рисунке 4.12 приведены вырезанные в этом сечении профили скорости.

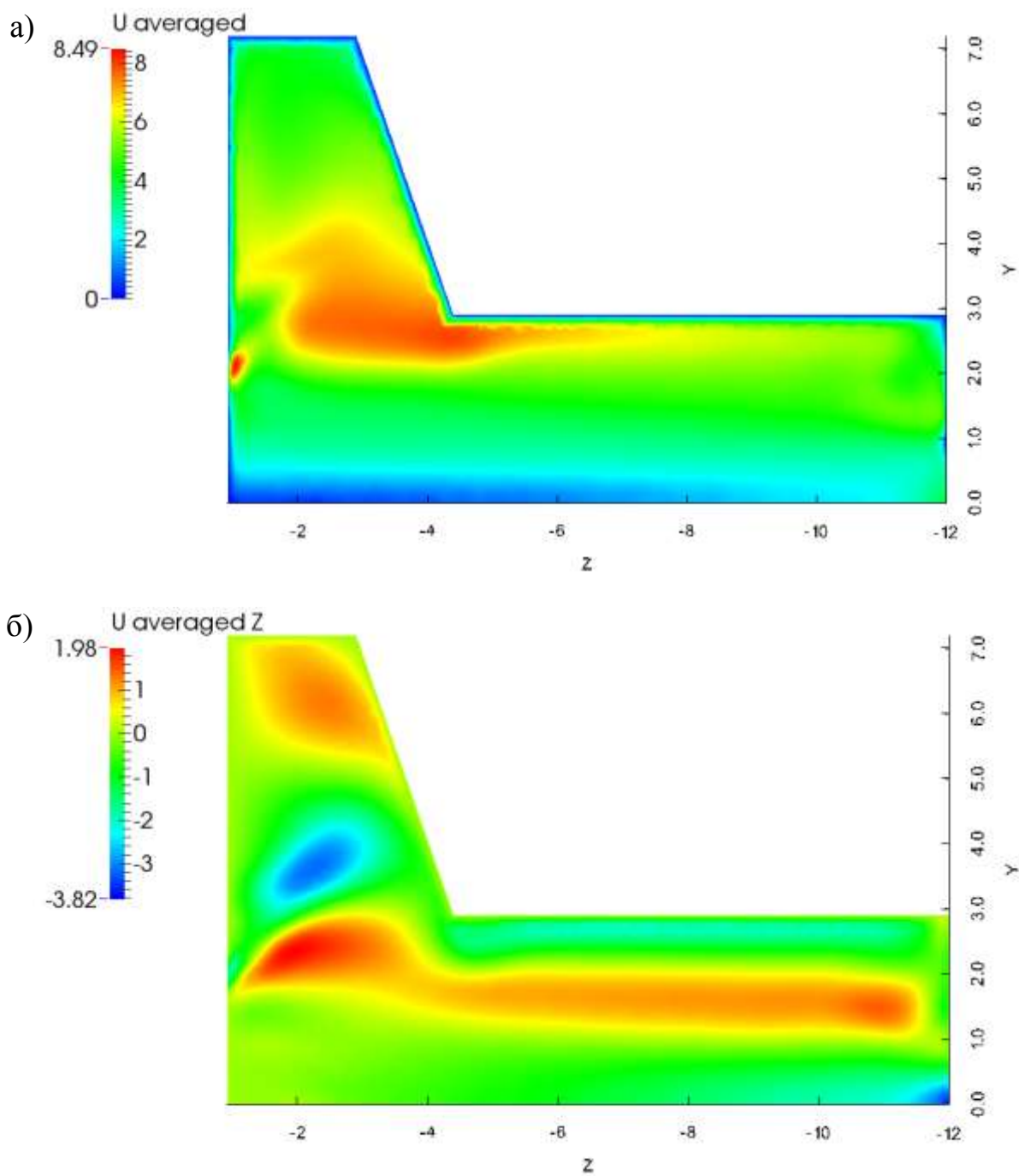


Рисунок 4.11 — Осреднённые в азимутальном направлении поля величин:
 а) модуль скорости потока керосина; б) осевая компонента скорости потока керосина

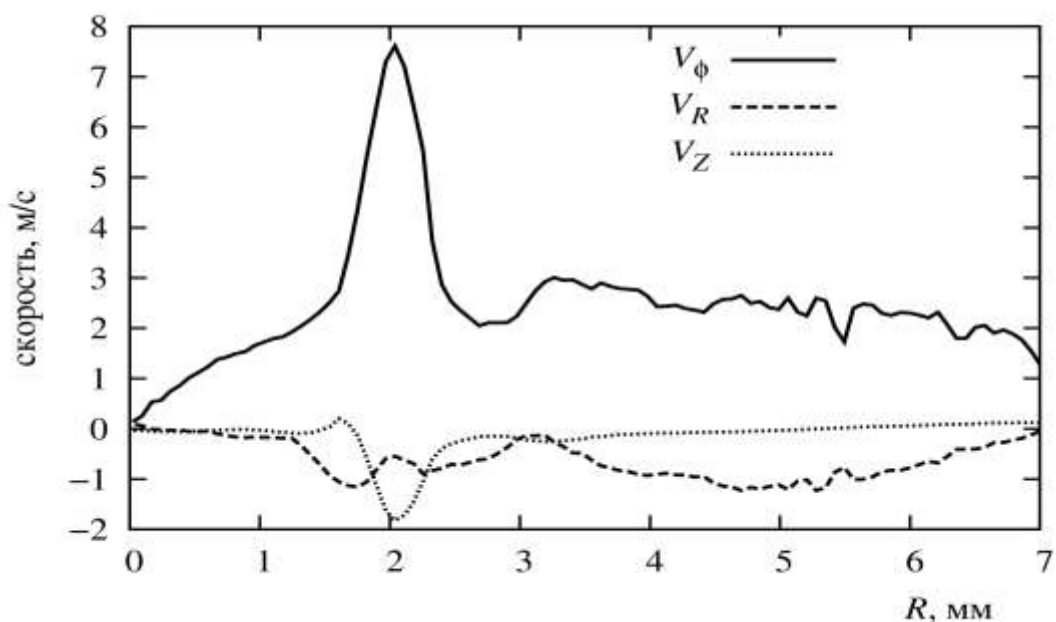


Рисунок 4.12 — Профили осреднённой в азимутальном направлении скорости потока керосина вблизи топливного завихрителя в зависимости от расстояния от оси R электрокаплеструйного форсуночного модуля

Анализируя распределения компонент скорости на рисунке 4.12, можно отметить следующие особенности. Расходная компонента скорости V_Z заметно отличается от 0 в небольшой области вблизи $R = 2$ мм, а её распределение в этой области близко к нормальному (отметим, что примерно на этом расстоянии находится паз топливного завихрителя). Таким образом, при задании входного граничного условия для осесимметричного расчёта можно ограничиться заданием профиля только в области вблизи $R = 2$ мм. Азимутальная компонента скорости (обозначенная V_ϕ на рисунке 4.12) также имеет характерно выраженный максимум как раз вблизи $R = 2$ мм, и её распределение в этой области также близко к гауссову. Что касается радиальной компоненты V_R , то в области $R = 2$ мм она отлична от 0, однако, меньше остальных компонент и имеет сложное распределение. В этой связи было решено задавать осевую и азимутальную компоненты скорости в виде нормального распределения, а радиальную компоненту задавать постоянной по входному сечению.

На рисунке 4.13 приведены результаты регрессионного анализа распределений компонент скорости в области вблизи $R = 2$ мм. Регрессионные функции имеют следующий вид:

$$f_v(y) = 2 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right) \text{ м/с}, \quad (4.14)$$

$$f_{V_z}(y) = 1.8585 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{7 \cdot 10^{-8}}\right) \text{ м/с}. \quad (4.15)$$

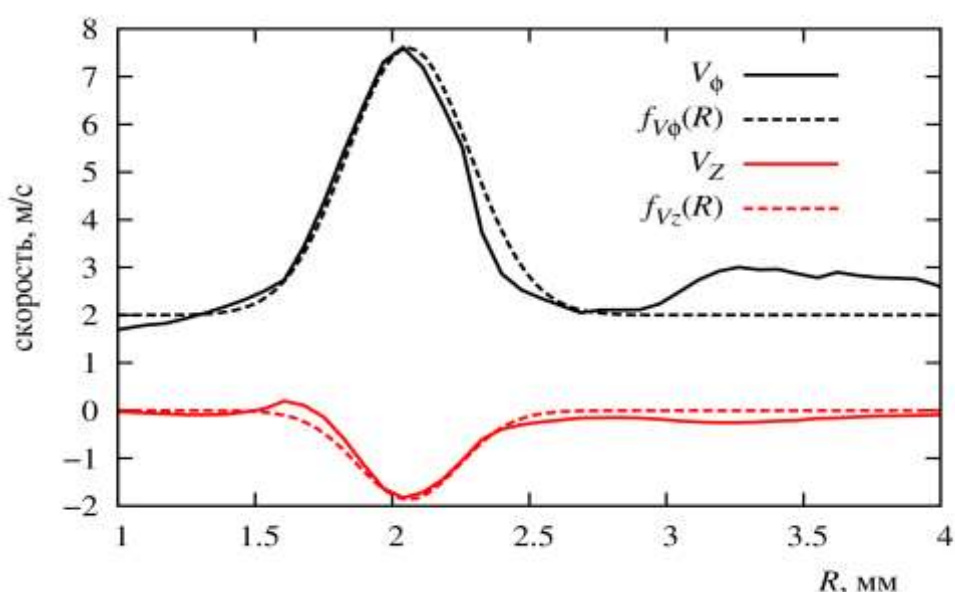


Рисунок 4.13 — Результат регрессионного анализа для осевой (V_z) и азимутальной (V_ϕ) компонент скорости керосина непосредственно за топливным завихрителем

Параметр закрутки потока керосина, определяемый как отношение максимальной азимутальной скорости к максимальной осевой скорости, потока керосина в данном случае составляет величину порядка 4, что означает высокую степень закрученности потока керосина.

Таким образом, в данном расчёте получены профили скорости потока керосина, которые можно использовать как входные параметры для учёта наличия топливного завихрителя потока в осесимметричной задаче переноса

электрического заряда в форсуночном модуле применительно к турбореактивным авиационным двигателям.

4.4 Исследование процесса переноса заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле авиационного турбореактивного двигателя при разных параметрах потока керосина и расчётной области

4.4.1 Постановка задачи

Для того, чтобы исследовать влияние параметров потока керосина на процессы переноса заряда была сформулирована задача о течении топлива в форсунке с учётом электрогидродинамического взаимодействия в осесимметричном приближении [1,2,15].

Электродная система форсуночного модуля изображена на рисунке 4.1. Таким образом, получаем систему электродов типа «игла — плоскость с отверстием», поскольку, в этом случае возникает поток униполярных ионов от игольчатого электрода к плоскости, имеющих знак потенциала игольчатого электрода.

На рисунке 4.14 приведена предложенная расчетная схема форсуночного модуля с электродами.

Ось Z — ось симметрии, R — радиальная координата. Поток топлива (керосина) течёт слева направо. Электрод типа «плоскость с отверстием» имеет радиус скругления равный 1 мм. Игольчатый электрод выполнен в виде кольца с заострением, которое имеет радиус закругления 1 мкм. Все остальные поверхности — стенки — представляют собой диэлектрик, причём в настоящей работе считается, что диэлектрическая проницаемость стенок (в качестве материала которых используется керамика) больше, чем диэлектрическая проницаемость среды, и можно приближённо считать, что электрическое поле практически не проникает в материал стенок. В первом приближении пренебрегаем накоплением электрического заряда на на изолирующих элементах конструкции форсуночного модуля.

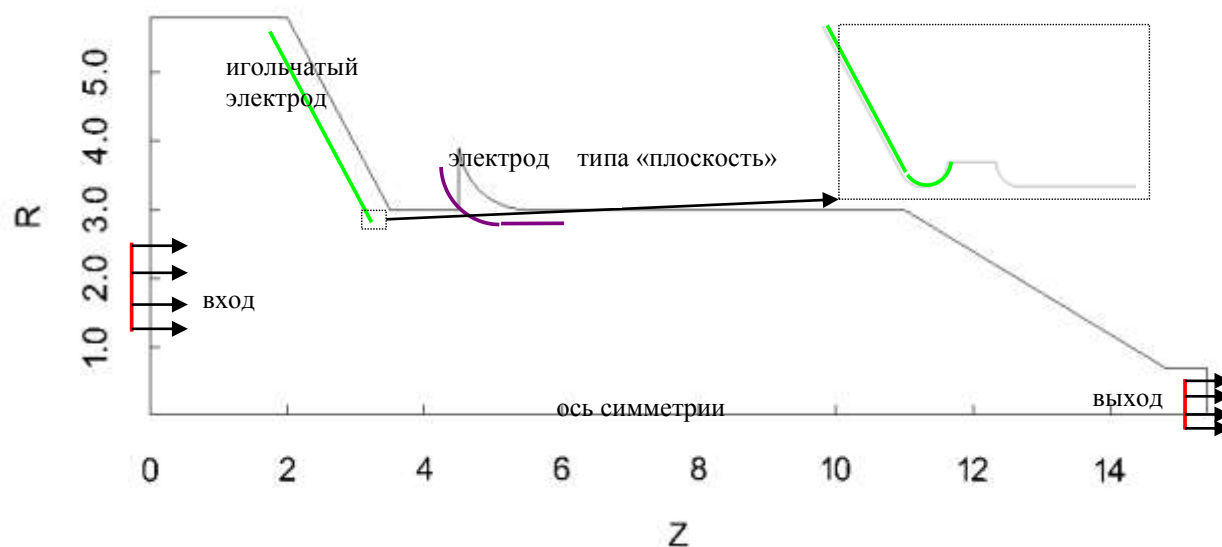


Рисунок 4.14 — Схема расчётной области для исследования процессов переноса заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле турбореактивного авиадвигателя и её фрагмент вблизи кончика игольчатого электрода (размеры указаны в миллиметрах)

Отметим, что в приведённой на рисунке 4.14 схеме поверхность диэлектрика между двумя электродами создаёт канал для протекания топлива с таким же радиусом, как оба электрода и поверхность за вторым электродом, то есть игольчатый электрод не выступает в канал. Вопрос о влиянии радиуса этой диэлектрической поверхности будет рассмотрен ниже.

Свойства жидкости соответствуют свойствам керосина ТС-1: плотность $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$, динамический коэффициент вязкости $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,2$. Подвижность ионов в керосине бралась равной $b = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, ионный коэффициент диффузии $D = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Во всех расчётах задавались следующие граничные условия:

1. на всех стенках (в том числе и на электродах) для скорости потока задавалось условие прилипания;

2. на игольчатом электроде задавалось постоянный потенциал электрического поля, равный 15 кВ;
3. на электроде типа «плоскость с отверстием» задавался нулевой потенциал электрического поля;
4. на выходе из расчётной области задавалось фиксированное давление;
5. на игольчатом электроде задавался инжекционный поток ионов по формуле (2.33) с уточненными значениями констант A , B ;
6. на электроде типа «плоскость с отверстием» задавалось условие нейтрализации заряда (4.9).

На входе граничное условие варьировалось относительно «опорных» регрессионных функций (4.14), (4.15), полученных в предыдущем разделе. Параметры турбулентности на входе при этом считались неизменными и равными следующим величинам: $k_{in} = 0.22 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\omega_{in} = 20000 \text{ 1/с}$ (данные значения выбирались исходя из ранее отмеченного трёхмерного численного моделирования и значения турбулентной вязкости на входе, примерно на порядок большего, чем значение молекулярной вязкости).

Фрагменты типичной расчётной сетки, используемой в большинстве расчётов, представлены на рисунках 4.15 — 4.17. Сетка является трёхмерной, но в азимутальном направлении длиной в 1 ячейку, на осевых сечениях ставятся условия вращательной периодичности. Вблизи стенок и в области между электродами сетка имеет сильное сгущение для детального разрешения структуры течения. Также аккуратно разрешается область вблизи кончика игольчатого электрода как для более точного моделирования течения, но, в основном, для получения более точного разрешения электрического поля в этой области.

Поскольку (с точки зрения потока топлива) размеры кончика электрода сопоставимы с толщиной вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя, а значит такая точность разрешения течения вблизи кончика электрода в принципе не требуется. Размер сетки составляет около 100000 ячеек, большинство из которых является шестигранниками.

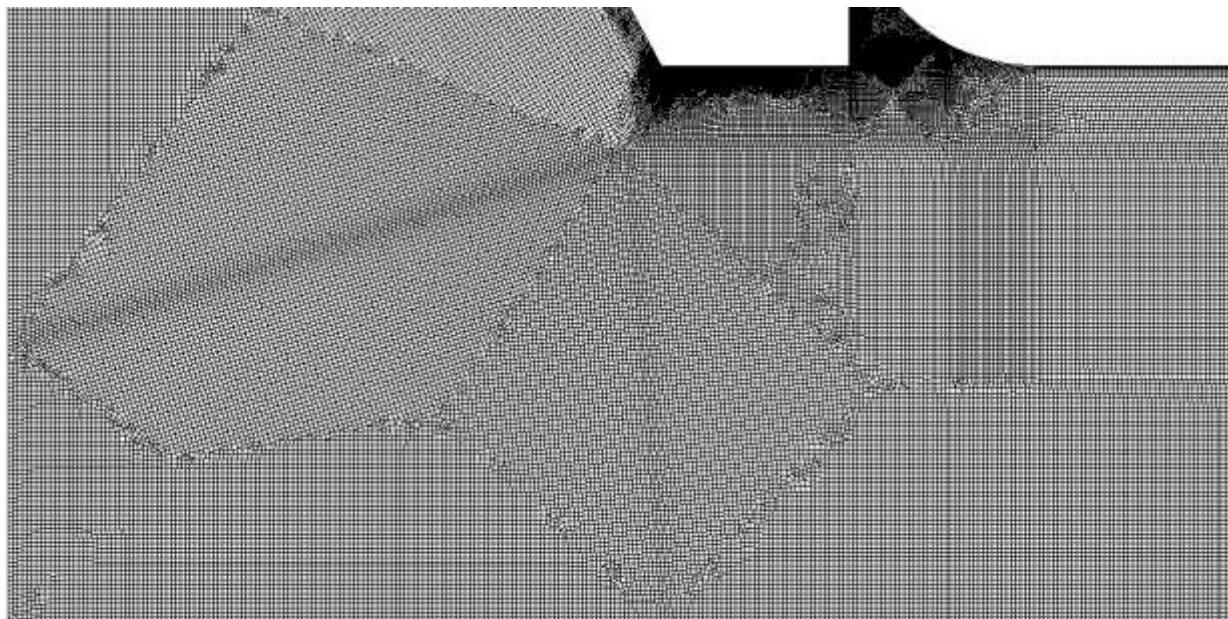


Рисунок 4.15 — Фрагмент расчётной сетки вблизи входной области электрокаплеструйного форсуночного модуля

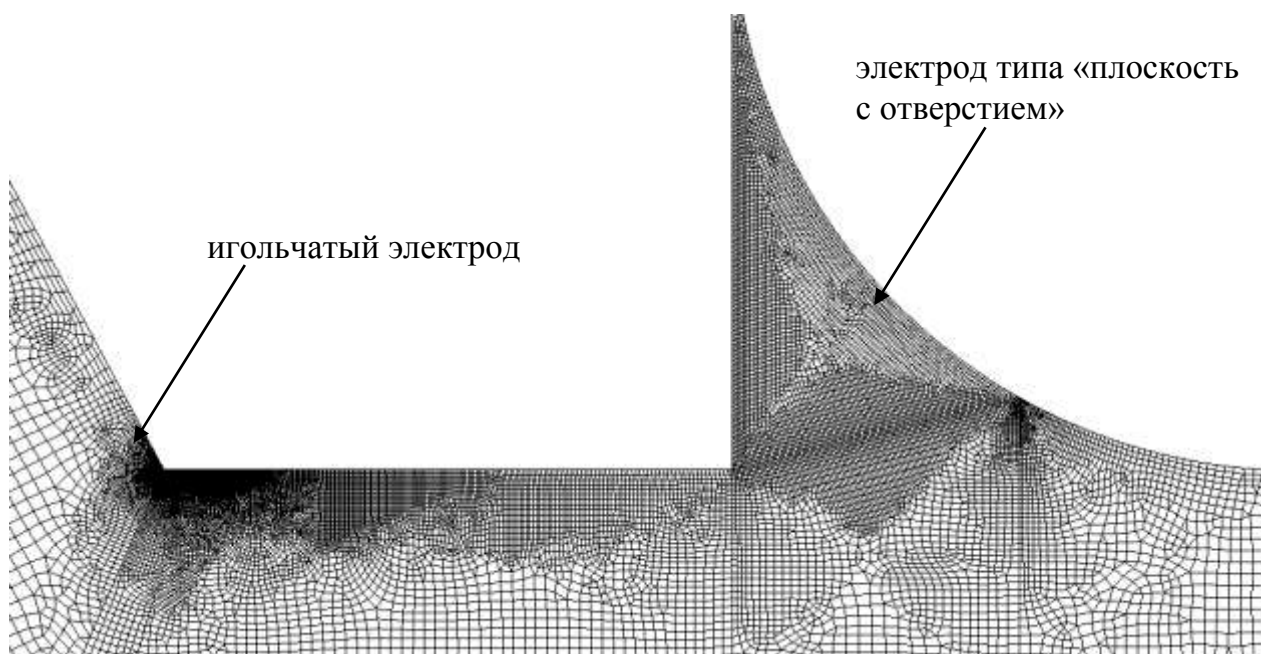


Рисунок 4.16 — Фрагмент расчётной сетки вблизи электродов электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю

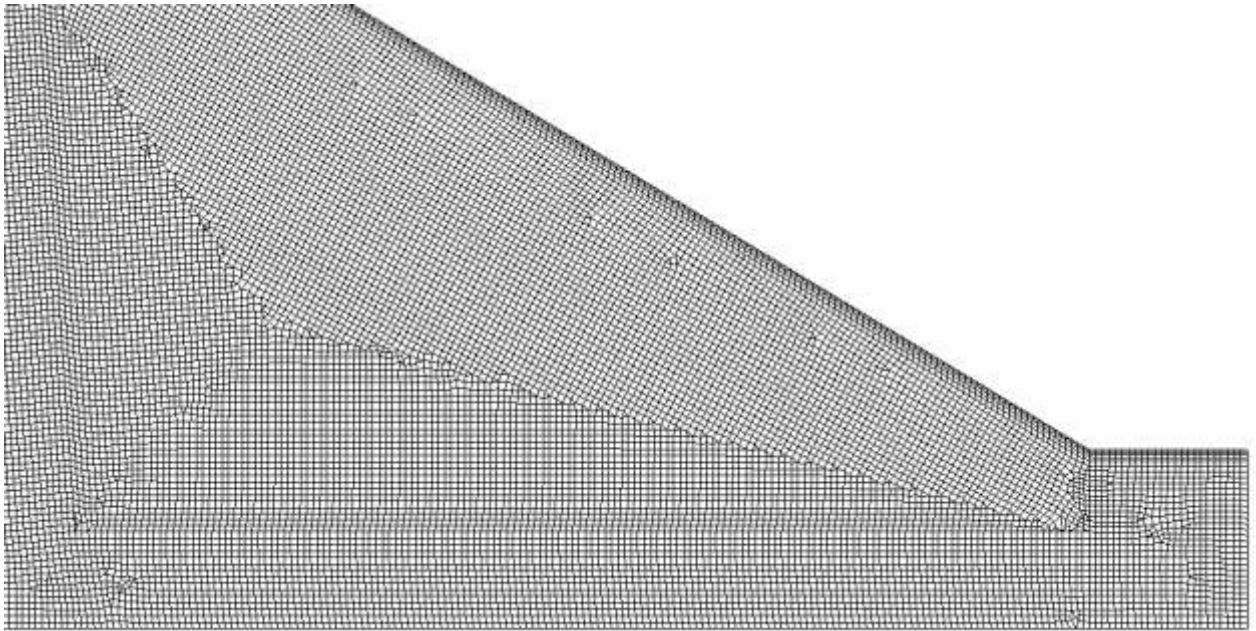


Рисунок 4.17 — Фрагмент расчётной сетки вблизи выхода из форсуночного модуля

4.4.2 Результаты расчета для исходного варианта электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю

В данном подразделе описываются результаты расчёта [1,2,15]. исходного варианта форсуночного модуля (см. рисунок 4.1), в котором использовались полученные в предыдущем параграфе входные граничные условия для компонент скорости по формулам (4.14), (4.15), то есть:

$$V_{\phi}(R) = 2 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right), \quad (4.16)$$

$$V_z(R) = 1.8585 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{7 \cdot 10^{-8}}\right), \quad (4.17)$$

где V_z и V_{ϕ} — осевая и азимутальная компоненты скорости. Радиальная компонента скорости V_R в данном расчёте полагалась равной 0. Следует отметить, что получаемый в расчёте объёмный расход топлива на входе с заданным по формуле (4.17) профилем осевой скорости равен 40.54 л/час.

Для ускорения расчёта сначала решалась стационарная задача с помощью решателя *simpleElectroFoam* (основанный на *simpleFoam* решатель уравнений электрогидродинамики), а затем проводился нестационарный расчёт при помощи решателя *pisoElectroFoam* (основанного на *pisoFoam*), поскольку, как оказалось, при использовании схем повышенного порядка точности (в частности, схемы *SFCD*) развиваются небольшие колебания потока.

Для примера на рисунке 4.18 приведены компоненты скорости в точках мониторинга, имеющих следующие координаты ($z; R$): 1 — во входной области вблизи оси (1 мм; 0,1 мм), 2 — в канале под электродом типа «плоскость с отверстием» (5 мм; 2 мм), 3 — около выхода из расчётной области (14 мм; 0,5 мм). Видно, что во входной области вблизи оси поток практически стационарен, вблизи электродов закрутка потока довольно большая (параметр закрутки порядка 10), осевая скорость невелика (около 0,5 м/с). На выходе форсунки происходит ускорение потока керосина за счёт сужения канала.

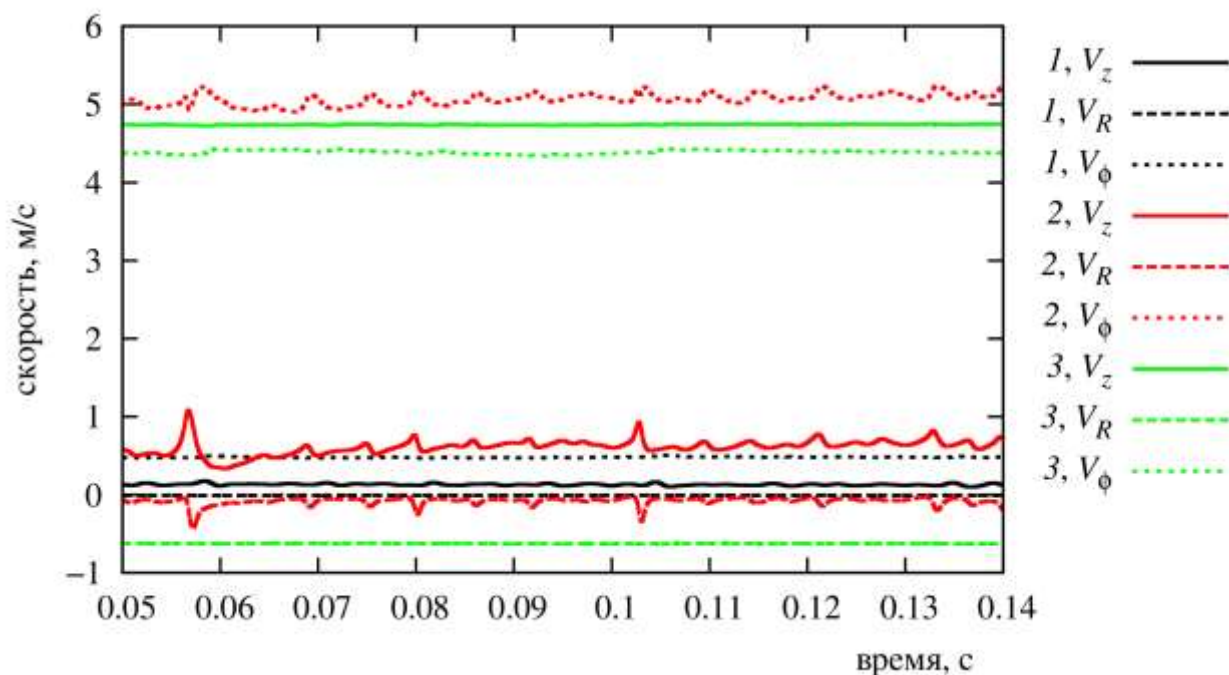


Рисунок 4.18 — Скорость потока керосина в точках мониторинга в электрокаплеструйном форсуночном модуле

Мгновенное поле скорости потока керосина представлено на рисунке 4.19. Отметим, что выходящий со стороны топливного завихрителя поток топлива

довольно быстро тормозится, так что в основном канале форсуночного модуля течение происходит с малой осевой скоростью. Закрутка потока керосина также максимальна на входе, однако, во всём канале поток керосина остаётся сильно закрученным, и азимутальная скорость потока увеличивается при сужении канала.

Следует также отметить развитие неустойчивости в пограничном слое при течении потока керосина вдоль диэлектрика, второго электрода и следующей за ним стенки: видимо, в результате сильной закрутки в пограничном слое возникает центробежная неустойчивость, приводящая к появлению структур, качественно похожих на вихри Тейлора-Гёртлера [310].

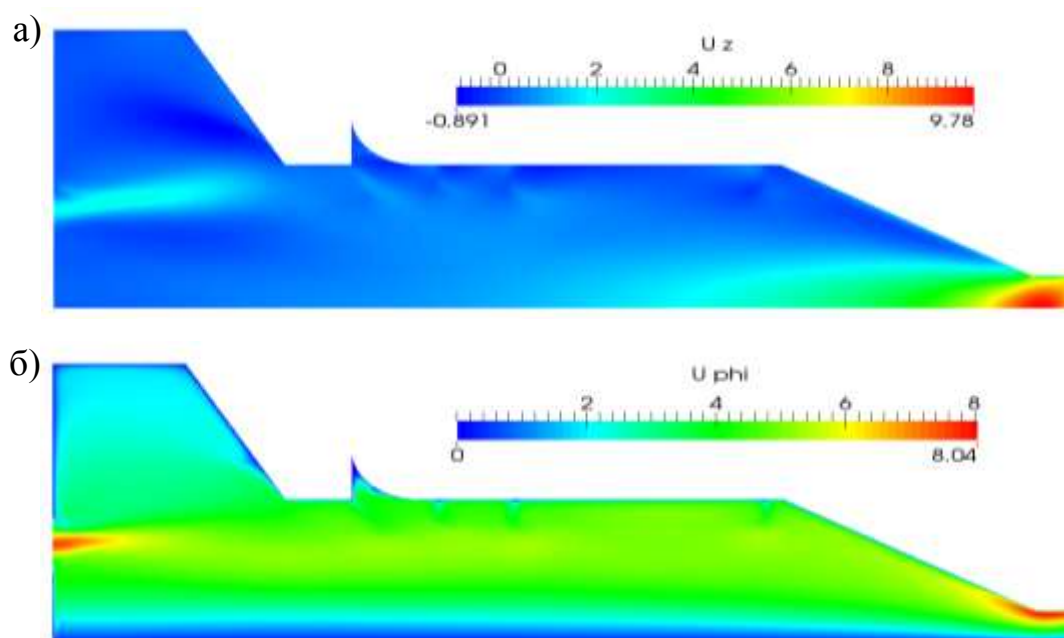


Рисунок 4.19 — Мгновенное распределение скорости потока керосина:

а) V_z , б) V_ϕ

На рисунке 4.20 приведены профили компонент скорости потока керосина в разных сечениях форсуночного модуля. Можно отметить, что распределение азимутальной компоненты скорости от оси до $R \approx 1$ мм соответствует квазитвёрдому вращению, при больших R эта компонента почти постоянна (за исключением резкого падения в пограничном слое вблизи стенки при $R > 2.5$ мм). Что касается характера изменения азимутальной компоненты вдоль Z , то видно, что её значение почти не меняется, т. е. степень закрутки потока керосина

сохраняется на всём протяжении канала форсуночного модуля до начала сужения канала.

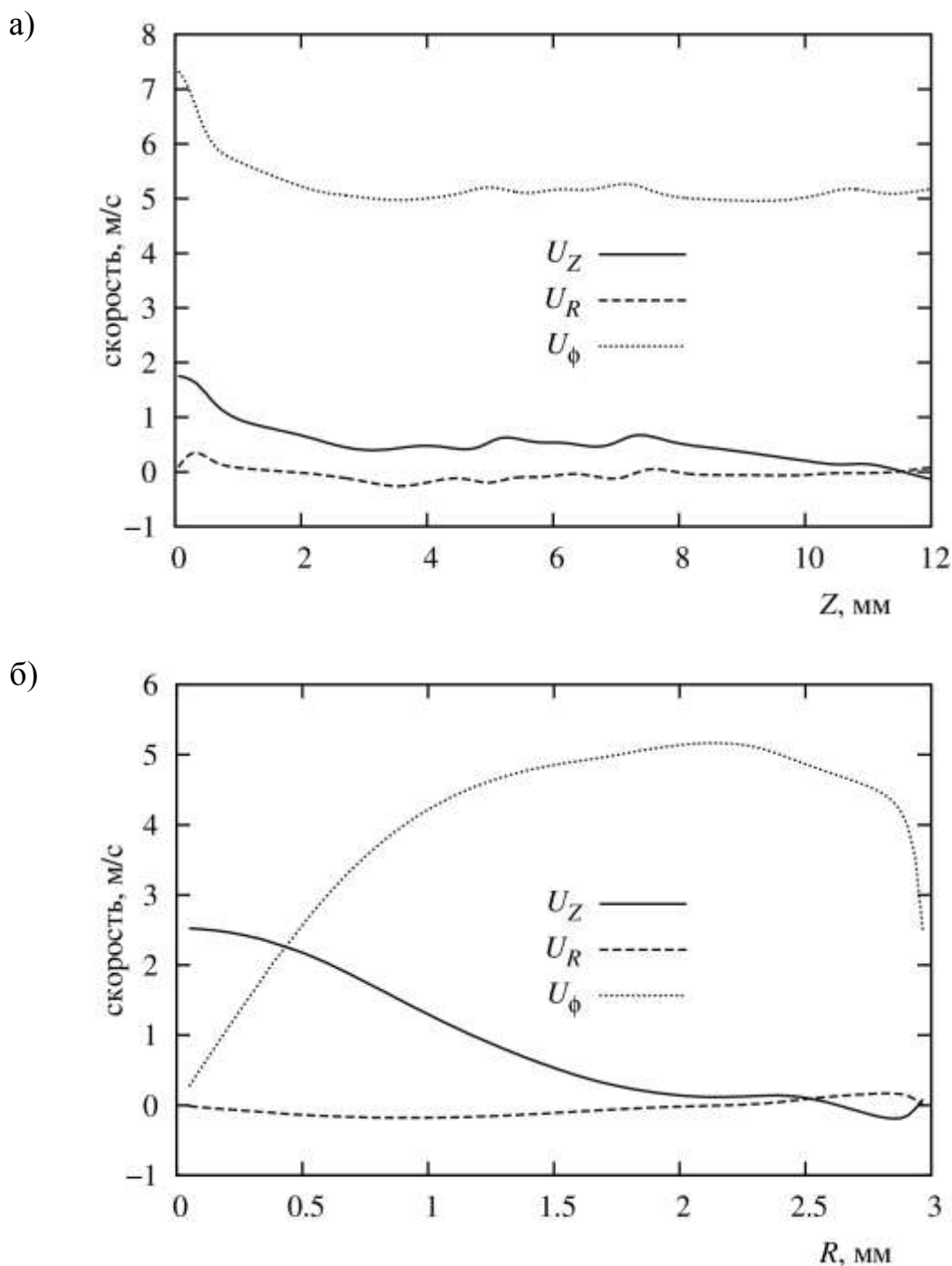


Рисунок 4.20 — Профили компонент скорости: закрученного потока керосина
а) вдоль Z при $R = 2$ мм; б) вдоль R при $Z = 11$ мм

На рисунке 4.21 представлено распределение модуля напряжённости электрического поля и силовые линии поля вблизи электродов. Отметим, что максимумы напряжённости приходятся на окончание первого электрода и при

огибании линий поля прямого угла диэлектрика. На кончике игольчатого электрода напряжённость достигает величины $3,86 \cdot 10^8$ В/м, а на углу диэлектрика — порядка $2,02 \cdot 10^7$ В/м. Таким образом, помимо области вблизи игольчатого электрода возникает локальный участок повышенной напряжённости, что может негативно влиять на свойства рассматриваемой системы. Этому вопросу будет посвящён отдельный параграф далее.

Также стоит отметить, что (как будет показано ниже) в рассматриваемом случае величина объёмного электрического заряда в большей части потока оказывается довольно малой, так что создаваемое им электрическое поле практически не влияет на приложенное внешнее электрическое поле.

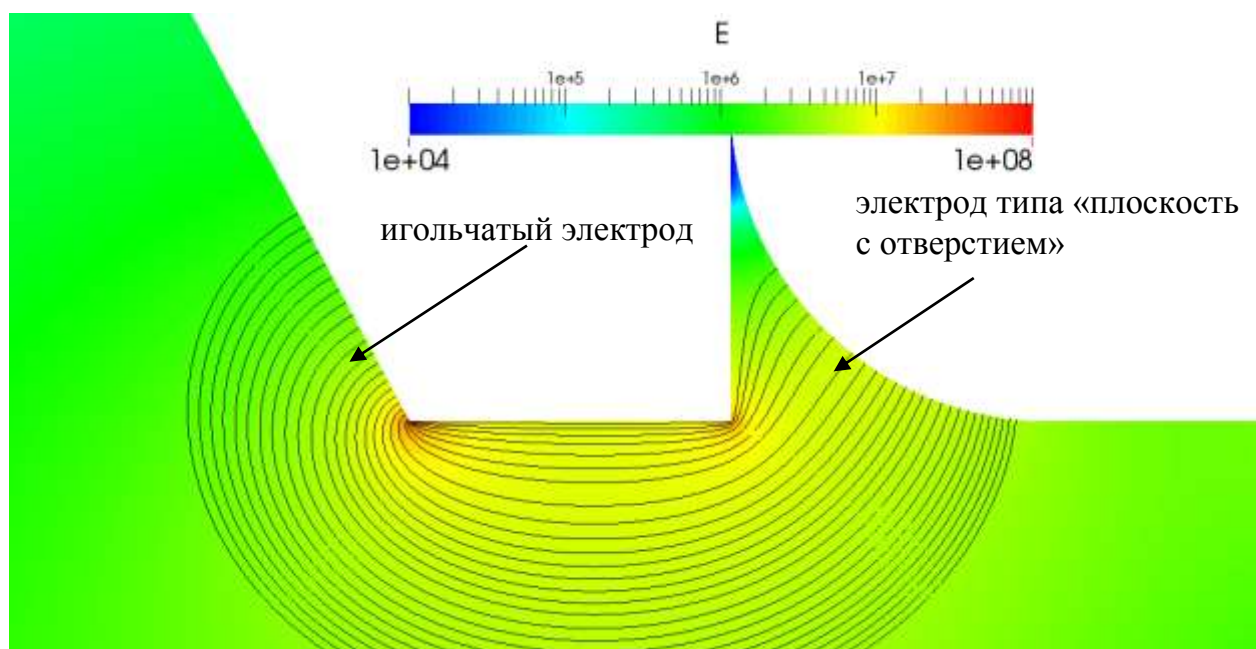


Рисунок 4.21 — Распределение модуля напряжённости и силовые линии электрического поля (шкала в логарифмическом масштабе)

Рассмотрим теперь картину распространения образующегося у игольчатого электрода электрического заряда в потоке керосина. На рисунке 4.22 приведено распределение плотности объёмного заряда во всей области и в различных сечениях форсуночного модуля. Отметим, что за счёт сильного турбулентного перемешивания заряд распространяется по всему каналу и в том числе достигает выходной границы. Максимальная концентрация объёмной плотности

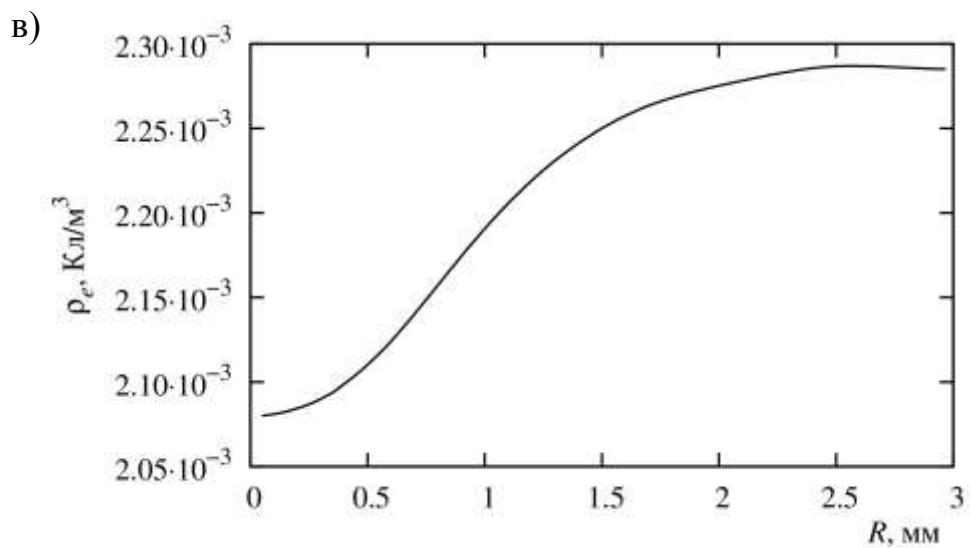
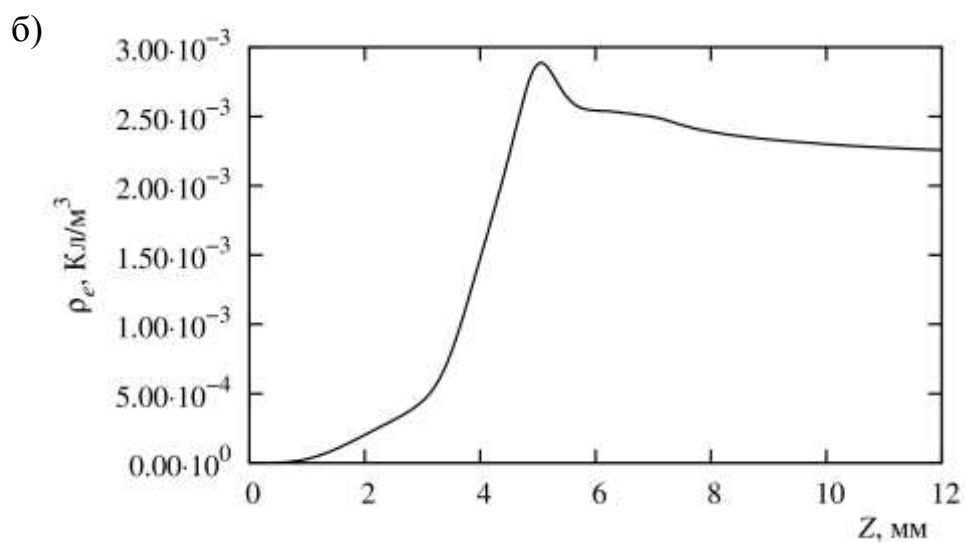
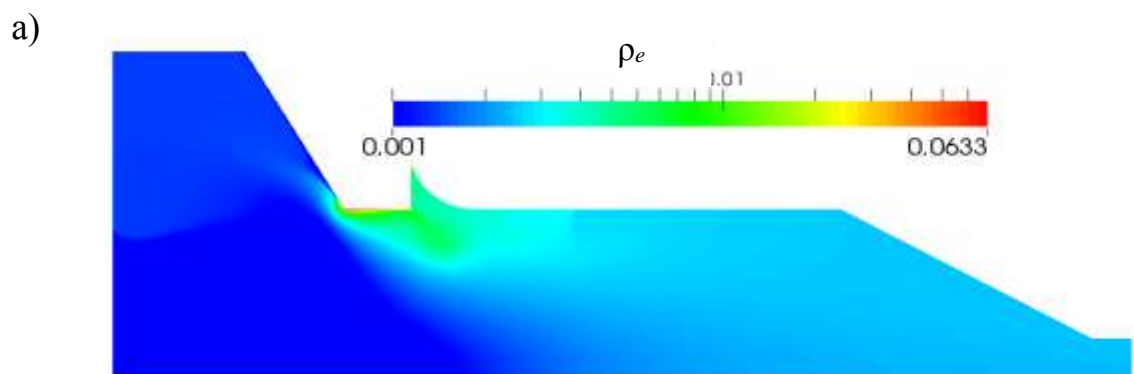


Рисунок 4.22 — Распределение объемной плотности электрического заряда ρ_e (Кл/м³):

а) общая картина (масштаб шкалы логарифмический); б) вдоль Z при $R = 2$ мм; в) вдоль R при $Z = 11$ мм

электрического заряда (порядка $0,06 \text{ Кл/м}^3$) сосредоточена вблизи кончика игольчатого электрода и вдоль изолятора между электродами.

С точки зрения вопроса о количестве выносимого из форсуночного модуля электрического заряда важно знать относительную величину плотности тока на выходе к плотности тока образующегося у игольчатого электрода. В дальнейшем это отношение будем обозначать I :

$$I = \frac{\int \vec{j} \cdot \vec{n} dS}{\int \vec{j}_{inj} \cdot \vec{n} dS}, \quad (4.18)$$

где плотность тока \vec{j}_{inj} определена по формуле (2.33).

Такое же соотношение можно записать для относительного потока нейтрализуемых на электроде типа «плоскость с отверстием» зарядов. В нестационарном решении и инжектируемый, и выходящий через форсуночный модуль, и нейтрализуемый на другом электроде потоки ионов зависят от времени. Поэтому более оправдано в знаменателе (4.18) использовать не значение потока инжектируемых ионов в текущий момент времени, а среднее значение $\int \vec{j}_{inj} \cdot \vec{n} dS$, которое в данном расчёте равно $4,186 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/с}$.

На рисунке 4.23 представлена зависимость величины I , вычисленной по формуле 4.18 для тока ионов на выходе из форсуночного модуля, нейтрализуемых на электроде типа «плоскость с отверстием» и инжектируемых с игольчатого электрода, от времени. Видно, что в данном случае количество выходящего заряда превышает количество нейтрализуемого на электроде типа «плоскость с отверстием» почти в 4 раза (чуть более 80% инжектируемого заряда выносятся из форсунки), что даёт основание рассматривать предложенную электрогидродинамическую систему форсуночного модуля как достаточно эффективную и обеспечивающую относительно большую долю выносимого заряда.

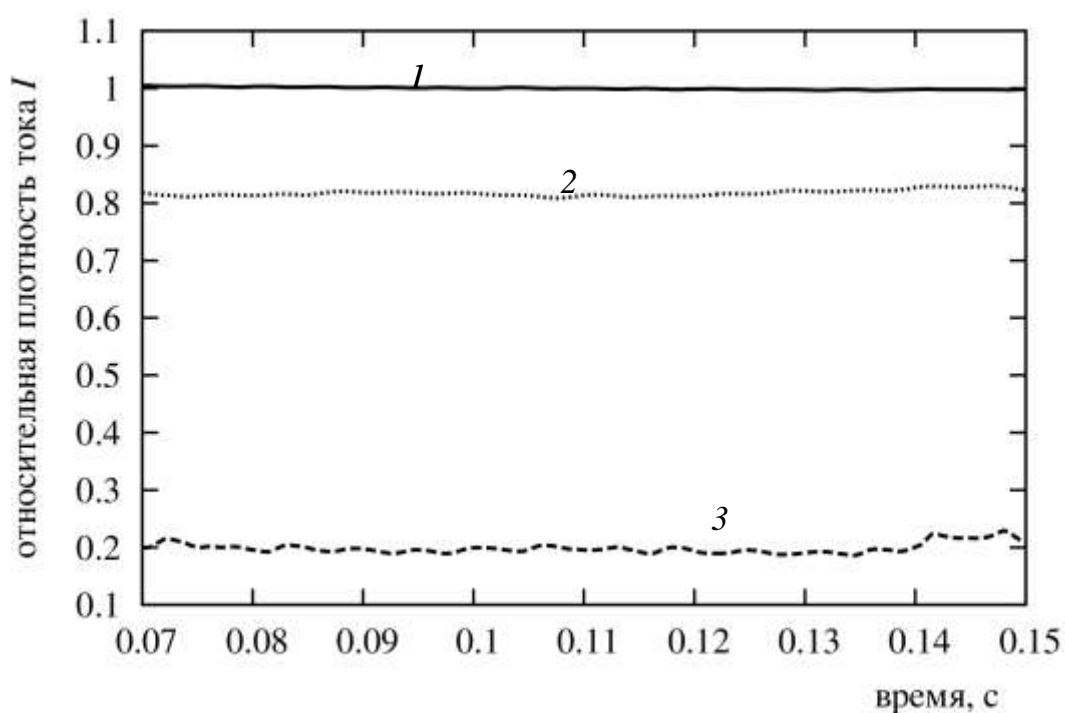


Рисунок 4.23 — Относительная плотность потока ионов в электрокаплеструйном форсуночном модуле применительно к турбореактивному авиалвигателю (1 — образующихся у игольчатого электрода в канале форсуночного модуля, 2 — нейтрализуемых на электроде типа «плоскость с отверстием», 3 — выходящих из топливной форсунки)

4.5 Исследование влияния размеров межэлектродного участка на перенос заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле

В предыдущем параграфе было отмечено, что предложенная исходная электродная система хоть и обеспечивает довольно высокую долю выносимого из форсунки заряда, но может приводить к накоплению заряда на межэлектродном изоляторе, электрическое поле которого будет влиять на вынос заряда из форсуночного модуля.

С целью уменьшить данный эффект было предложено увеличивать радиус канала, образованного межэлектродным изолятором. Однако слишком сильное увеличение этого расстояния может привести к неприемлемому росту гидравлического сопротивления форсуночного модуля и его габаритов. Для того

чтобы изучить данную проблему, было также рассмотрено две геометрии расчётной межэлектродной области, представленные на рисунке 4.24.

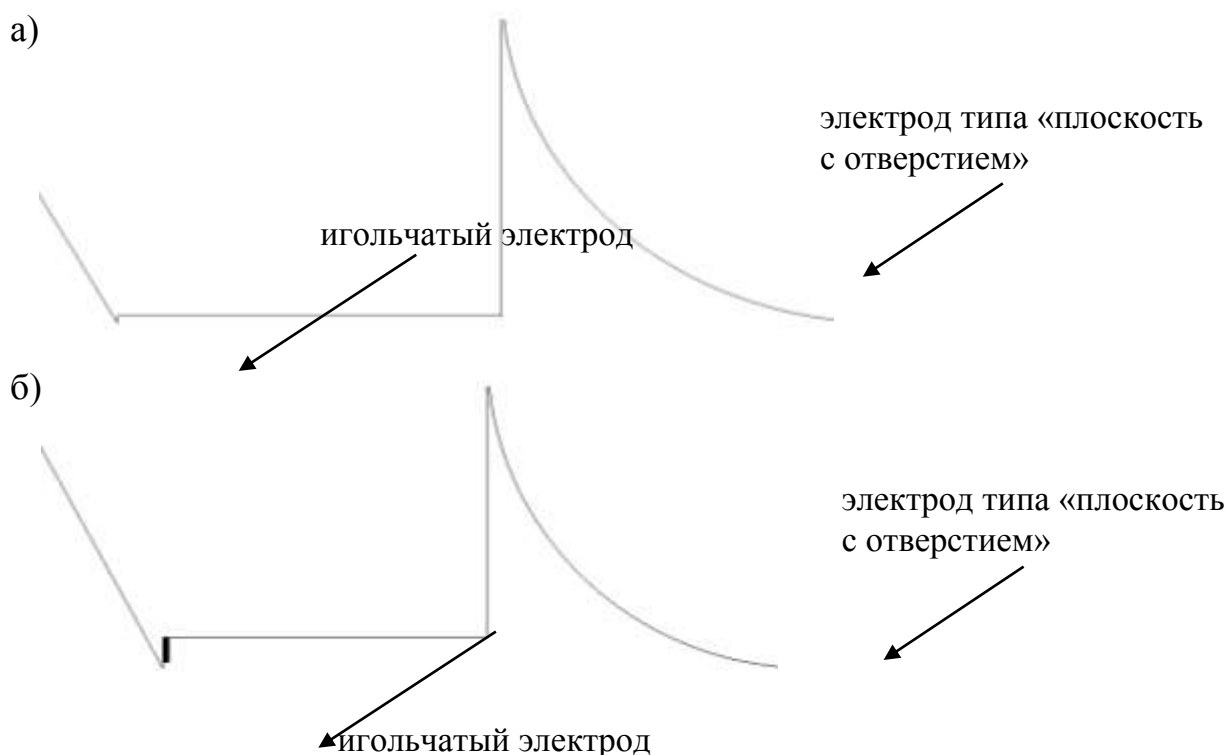


Рисунок 4.24 — Рассмотренные геометрии межэлектродного участка электрокаплеструйного форсуночного модуля:
межэлектродный изолятор отступает от кончика электрода на а) 10 мкм;
б) 100 мкм

Первая геометрия отличается от исходной тем, что межэлектродный диэлектрик имеет на 10 мкм больший радиус, чем электроды. Во второй геометрии это расстояние составляет 100 мкм. Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{2(p_{\text{вход}} - p_{\text{выход}})}{\rho V_{\text{вход}}^2}, \quad (4.20)$$

где индекс «вход» означает среднее значение величины на входе, «выход» — среднее значение на выходе.

В таблице 4.2 приведены коэффициенты сопротивления, полученные в исходной геометрии и рассматриваемых, а также относительная плотность тока на выходе из форсуночного модуля и у игольчатого электрода по отношению к плотности электрического тока в исходной геометрии, составляющей значение $4,186 \cdot 10^{-10}$ Кл/с.

Таблица 4.4 — Коэффициент сопротивления ξ и относительная плотность тока ионов на выходе $I_{выход}$ и инжектируемых с игольчатого электрода I_{inj} для разных геометрий

	Исходная геометрия	Вариант 10 мкм	Вариант 100 мкм
Ξ	5,66	5,65	5,63
I_{inj}	1	1,13	1,39
$I_{выход}$	0,816	0,862	1,03
$I_{выход}/I_{inj}$	0,816	0,763	0,741

Из таблицы 4.2 видно, что значения коэффициента сопротивления меняется от геометрии к геометрии в пределах погрешности вычислений. Однако величина инжектируемого заряда с игольчатого электрода увеличивается при увеличении радиуса межэлектродного изолятора. Соответственно увеличивается плотность тока на выходе, хотя в относительных единицах (отношение плотности электрического тока на выходе к плотности тока инжектируемого заряда) для модифицированных геометрий наблюдается некоторое уменьшение. Поэтому есть основания предполагать, что существует оптимальная геометрия, при которой количество и инжектируемого, и выносимого из форсунки заряда будет максимальным (при этом коэффициент сопротивления если и увеличится, то несущественно).

Кроме того, размеры межэлектродного участка надо подбирать исходя из требования минимизации накопления заряда на диэлектрике.

На рисунке 4.25 приведены распределения объёмной плотности электрического заряда (в Кл/м³) для трёх вариантов межэлектродного промежутка. Видно, что наименьшее количество заряда на изоляторе наблюдается в случае наибольшего радиуса межэлектродного изолятора. Для более подробного изучения данного эффекта необходимо сформулировать соответствующую модель осаждения заряда на изоляторе с учётом проницаемости изолятора электрическим полем и провести детальные расчёты.

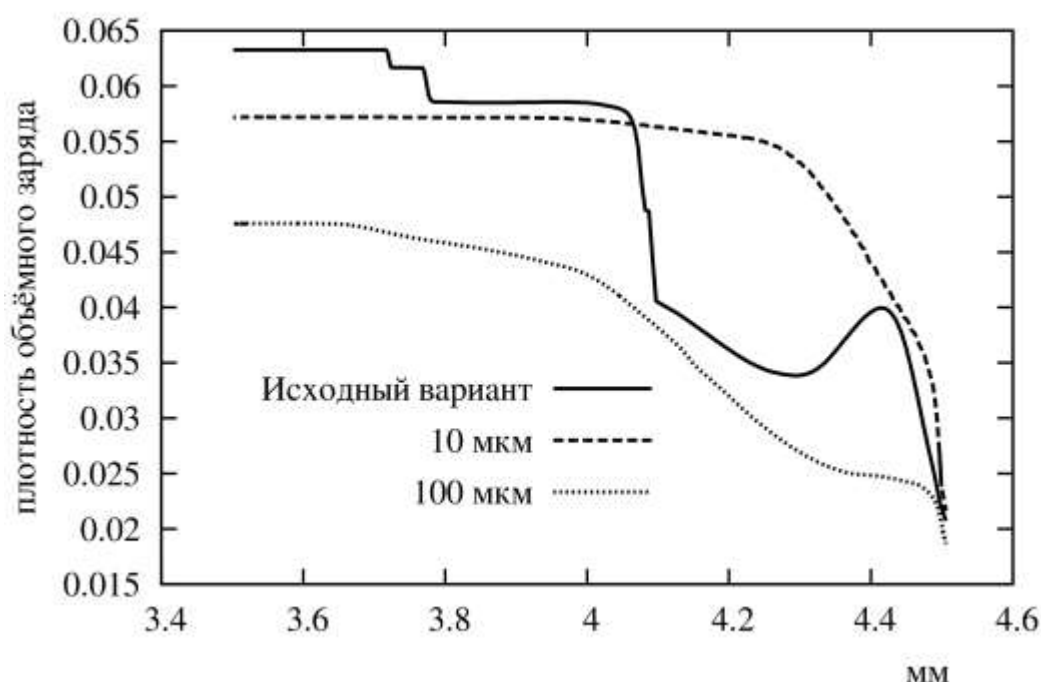


Рисунок 4.25 — Распределение плотности объёмного заряда на межэлектродном изоляторе для разных геометрий межэлектродного участка электрокаплеструйного форсуночного модуля

4.6 Влияние входных граничных условий на перенос заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле

Чтобы оценить влияние входных граничных условий на исходной геометрии форсуночного модуля (рисунок 4.1) было проведено 3 расчёта с разными степенями закрутки на входе и радиальной компоненты скорости (при

неизменном расходе керосина , т. е. осевой компоненте скорости). Для каждого из вариантов осевая компонента скорости задавалась по формуле (4.18).

Вариант 1: $V_R = -1$, $V_\phi(R) = 2 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right)$ (азимутальная

компонента скорости как в исходном варианте, радиальная ненулевая).

Вариант 2: $V_R = 0$, $V_\phi(R) = 1 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right)$ (азимутальная компонента

уменьшена).

Вариант 3: $V_R = 0$, $V_\phi(R) = 4 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right)$ (азимутальная компонента

увеличена).

В таблице 4.3 приведены значения относительной плотности тока ионов на выходе для исходного варианта и трёх представленных.

Таблица 4.5 — Относительная плотность тока ионов, образуемых у игольчатого электрода и выходящих из форсунки, для разных входных граничных условий

Вариант	I_{inj}	$I_{выход}$
Исходный	1	0.816
1	1.0	0.66
2	0.98	0.87
3	1.0	0.81

Анализируя значения $I_{выход}$ для разных вариантов граничных условий можно отметить следующее. Во-первых, изменение граничных условий в указанных пределах не сильно меняет картину течения в целом и процент выносимого заряда в частности, за исключением 1 варианта, в котором произошло заметное уменьшение количества выносимого из форсунки заряда. Увеличение закрутки потока практически не сказывается на количестве выносимого заряда, тогда как

небольшое уменьшение азимутальной скорости приводит к увеличению плотности потока ионов на выходе из форсунки. Однако, известно, что уменьшение закрутки потока приводит к ухудшению качества распыла топлива за форсункой. Таким образом, для более точного прогнозирования эффективности распыла топлива при наличии электрического заряда необходимо провести исследования процессов каплеобразования закрученной струи при выходе из форсунки как при отсутствии заряда в струе, так и при его наличии.

Таким образом, проведено численное моделирование течения топлива в электрокаплеструйном форсуночном модуле авиационного турбореактивного двигателя, как без учета, так и с учётом электрогидродинамического взаимодействия. На основе анализа литературных данных показано, что выбранный способ моделирования является вполне адекватным для получения инженерных оценок и выработки рекомендаций по обеспечению максимального электрического заряда в закрученном потоке топлива на выходе форсунки.

Были решены следующие задачи:

1) Проведено трехмерное моделирование турбулентного течения в электрокаплеструйном форсуночном модуле с учётом топливного завихрителя (но без электрогидродинамики) с целью получения опорных данных при постановке входных граничных условий для осесимметричных расчётов без завихрителя (с учётом электрогидродинамики). Показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение является практически осесимметричным, профили скорости непосредственно за завихрителем могут быть аппроксимированы к гауссовым распределениям.

2) Проведён численный расчёт течения в электрокаплеструйном форсуночном модуле в осесимметричном приближении с учётом переноса заряда. Показано, что даже при использовании такой модели течение является нестационарным. При этом за счёт интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки электрического заряда достигает около 80% образуемого у игольчатого электрода заряда. Для более точного описания течения и процессов переноса заряда также следует провести расчёт с использованием

вихреразрешающих моделей, однако, такие расчёты весьма требовательны к вычислительным ресурсам.

3) Исследовано влияние варьирования геометрических параметров форсунки и входных граничных условия на процессы переноса заряда. В частности, показано, что количество выносимого заряда немного увеличивается при уменьшении закрутки потока, и существенно увеличивается количество инжектируемого заряда при удалении межэлектродного изолятора. Однако при этом доля выносимого заряда немного снижается, поэтому следует ожидать, что существует оптимальное расстояние, на которое необходимо «отодвинуть» изолятор для получения максимального заряда на выходе из форсунки.

По результатам работы можно сделать следующие рекомендации. Для обеспечения максимального заряда следует соответствующим образом профилировать межэлектродный изолятор, поскольку, как было отмечено в предыдущем абзаце, существует некоторый оптимум. Однако, слишком сильное «отодвигание» изолятора может увеличить коэффициент гидравлического сопротивления электрокаплеструйного форсуночного модуля и несколько исказить картину течения керосина. Но уже, исходя из результатов настоящей работы, можно рекомендовать закруглять дальний от электрода типа «игла» край межэлектродного изолятора для уменьшения напряжённости электрического поля в этой области. Что касается вопроса влияния входных граничных условий, то настоящие исследования не выявили существенных отличий в решениях при варьировании граничных условий в пределах нескольких десятков процентов от исходных «опорных».

4.7 Трёхмерное моделирование течения керосина ТС-1 и переноса заряда в электрокаплеструйном форсуночном модуле применительно к турбореактивному авиадвигателю

В предыдущих параграфах рассматривалась задача течения керосина и переноса заряда в форсуночном модуле в осесимметричной постановке с использованием RANS-подхода для моделирования турбулентности.

Для того, чтобы оценить влияние осесимметричности и модели турбулентности для одного из варианта также были проведены расчеты в полной трехмерной постановке по методу крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) с использованием подсеточной модели турбулентности и неявного метода LES (Implicit LES, ILES, или недоразрешенного прямого численного моделирования, Direct Numerical Simulation, DNS).

4.7.1 Постановка задачи

Расчётная область, представленная на рисунке 4.26, не включает в себя целиком топливный завихритель, а только выходы из его пазов топливного завихрителя, из которых в заданном направлении и с заданным расходом происходит истечение топлива. Расположение выходов пазов завихрителя представлено на рисунке 4.27.

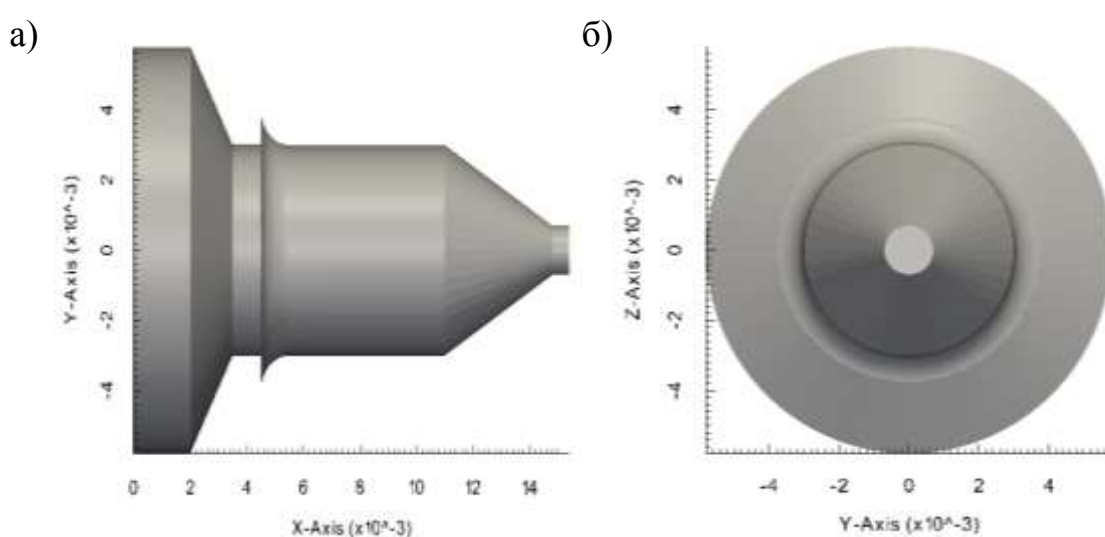


Рисунок 4.26 — Геометрия расчётной области:

а) вид сбоку; б) вид спереди

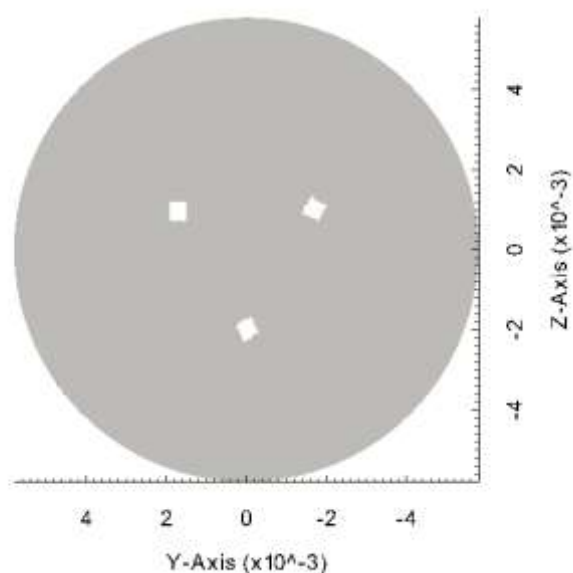


Рисунок 4.27 — Расчётная область, вид сзади. Белые квадраты — выходы из пазов топливного завихрителя

На рисунке 4.28 показано сечение геометрии форсуночного модуля с отмеченными на нём границами, представляющими собой электроды ЭУВТ. Отметим, что расположение и геометрия электродов ЭУВТ в точности соответствует осесимметричным расчетам, описанным в предыдущих параграфах.

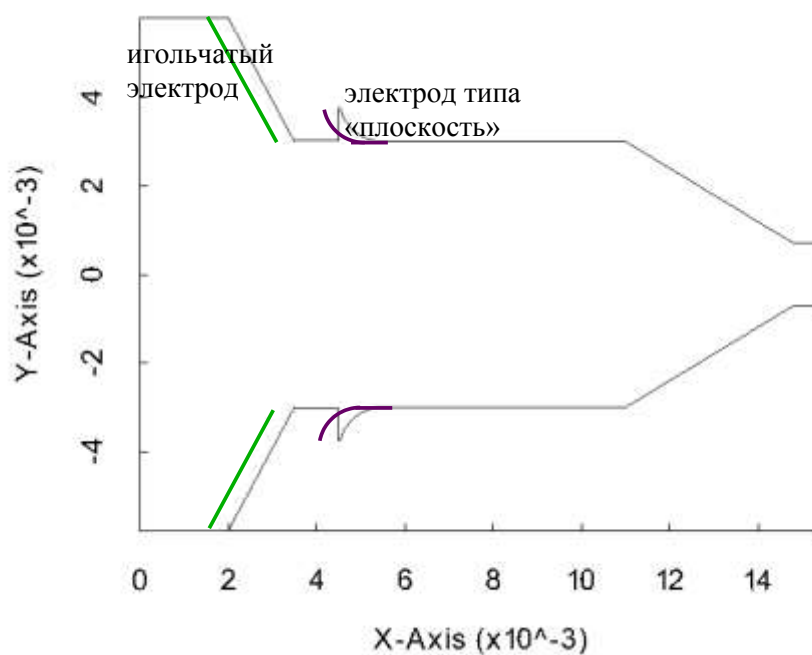


Рисунок 4.28 — Осевое сечение расчётной области с выделенными электродами ЭУВТ

Граничные условия для обоих вариантов расчёты (LES с подсеточной моделью и ILES) задаются следующим образом: на выходе из пазов топливного завихрителя задаётся постоянная скорость таким образом, чтобы обеспечить расход керосина 40 л/ч, направление соответствует направлению пазов топливного завихрителя.

На выходе из расчётной области задаётся условие постоянного давления.

На игольчатом электроде задаётся потенциал 15 кВ, электрод типа «плоскость» имеет нулевой потенциал.

Инжекция ионов задаётся таким же образом, как при рассмотрении осесимметричной постановки.

При расчёте по методу LES используется модель IDDES, где в качестве подсеточной модели выступает модель Спаларта-Аллмараса. Отметим, что IDDES является гибридным RANS-LES методом: вблизи стенки используется RANS модель турбулентности Спаларта-Аллмараса.

4.7.2 Результаты численного трехмерного моделирования электрогидродинамического течения закрученного потока керосина в электрокаплеструйном форсуночном модуле при различных методах (ILES и IDDES) применительно к турбореактивному авиационному двигателю

На рисунке 4.29 приведены колебания компонент скорости закрученного потока керосина в двух точках мониторинга в расчётах по методу ILES, а на рисунке 4.30 — аналогичные графики, полученные в расчётах по методу IDDES. Точки мониторинга имеют следующие координаты: 1 — $X = 5$ мм, $Y = 2$ мм, $Z = 0$, 2 — $X = 14$ мм, $Y = 0,5$ мм, $Z = 0$ (первая точка располагается на удалении примерно 1 мм от электрода типа «плоскость», вторая точка — вблизи выхода из форсунки).

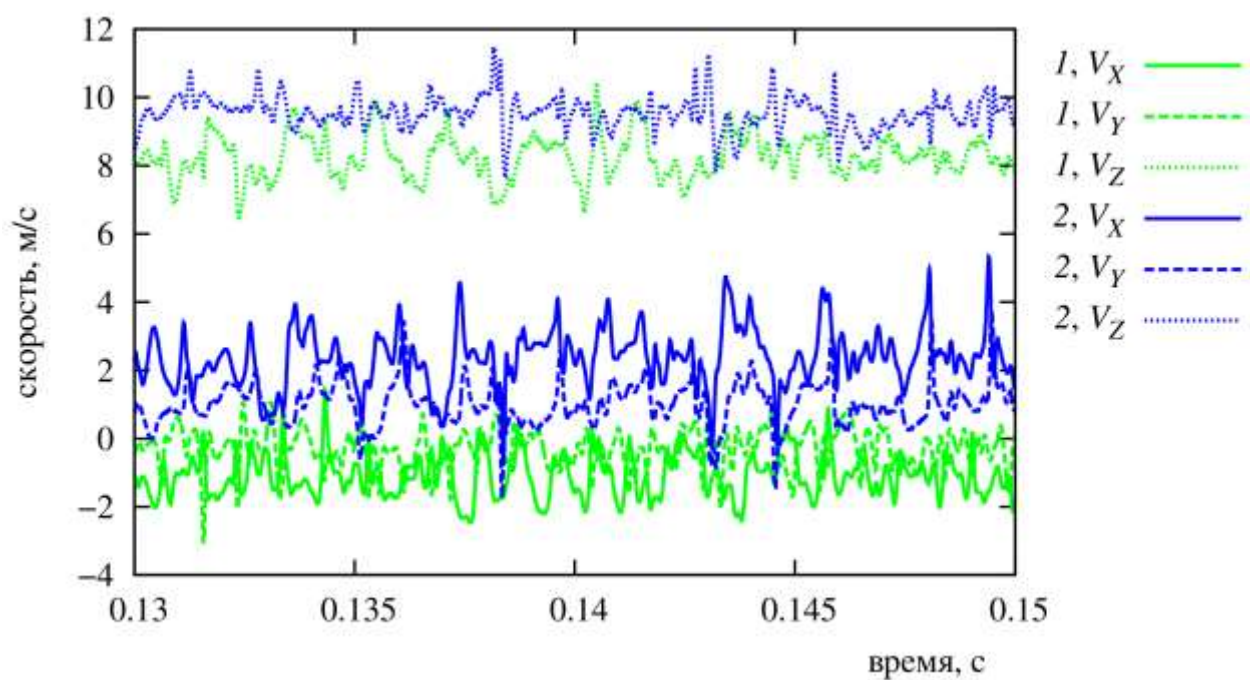


Рисунок 4.29 — Компоненты скорости закрученного потока керосина ТС-1 в точках мониторинга (метод ILES)

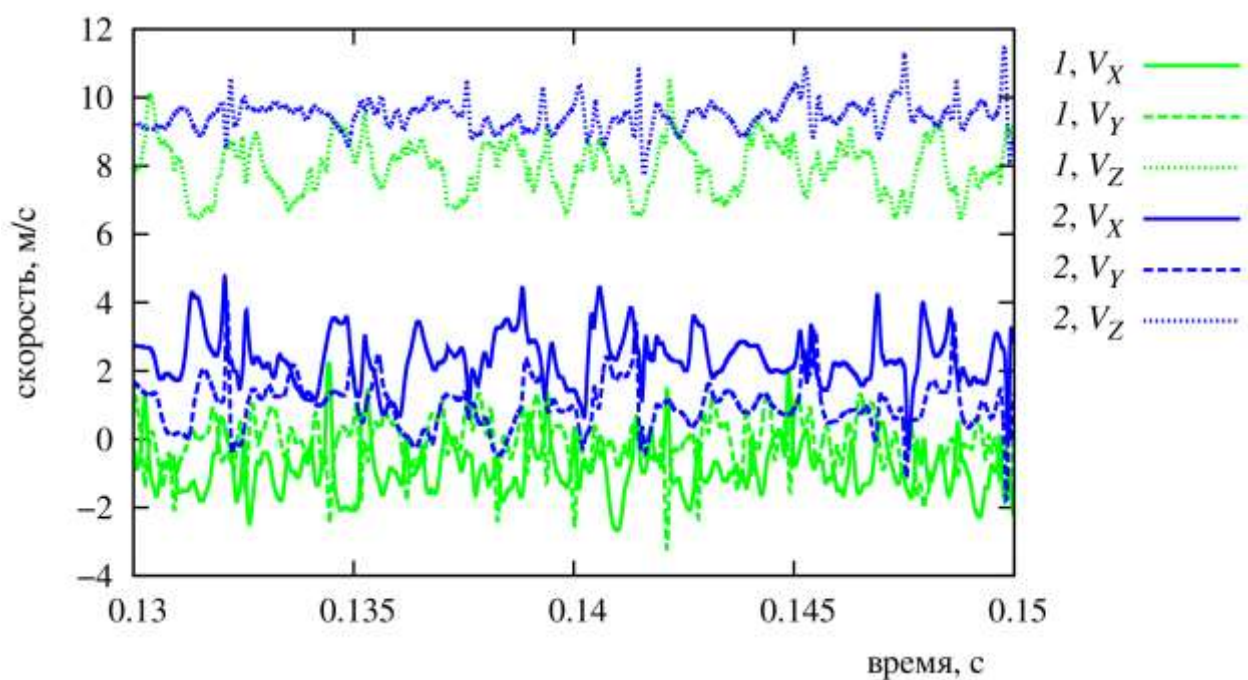


Рисунок 4.30 — Компоненты скорости закрученного потока керосина ТС-1 в точках мониторинга (метод IDDES)

Сравнивая рисунки 4.29 и 4.30 можно сделать вывод, что расчёты по методам ILES и IDDES дают весьма схожие картины течения, однако, в расчёте

по ILES в колебаниях присутствуют более высокочастотные компоненты, которые, очевидно, «сглаживаются» при использовании метода IDDES.

Что касается средних значений компонент скорости закрученного потока керосина в точках мониторинга, то оба метода дают примерно одинаковые значения, причем, вблизи выхода окружная компонента скорости (которая в данных точках совпадает с компонентой V_z) в несколько раз выше осевой V_x . Отметим, что значения средних скоростей потока керосина в рассматриваемых точках мониторинга оказываются примерно в 2 раза выше, чем в расчётах по осесимметричной модели.

Для сравнения с результатами, полученными для осесимметричной постановки, были получены осреднённые по времени поля исследуемых величин. Картину «течения в среднем» скорости потока топлива, полученного с использованием метода IDDES, иллюстрирует рисунок 4.31, на котором представлены распределения осевой и окружной компонент скорости V_x и V_φ закрученного потока керосина в двух ортогональных осевых сечениях.

Отметим, что в отличие от осесимметричного расчёта, в трехмерной постановке отчётливо наблюдается область возвратного течения. Что касается закрутки потока керосина, то в большей части расчётной области она немного выше, чем в осесимметричном расчёте, но при приближении к выходу окружная компонента растёт сильнее. Также стоит отметить тот факт, что при отдалении от топливного завихрителя течение в среднем становится осесимметричным.

Для сравнения результатов расчётов, полученных в трехмерной и осесимметричной постановке, были построены профили осредненной скорости потока керосина в разных сечениях (см. рисунок 4.32). Видно, что в основном осесимметричный расчёт и трехмерный сильно расходятся: наиболее отчётливо это наблюдается для окружной компоненты скорости, которая систематически занижена в осесимметричном расчёте. Также различный характер имеют распределения для осевой компоненты скорости закрученного потока керосина: в осесимметричной постановке осевая компонента практически везде

положительна, тогда как в трехмерной существуют области сильных обратных токов.

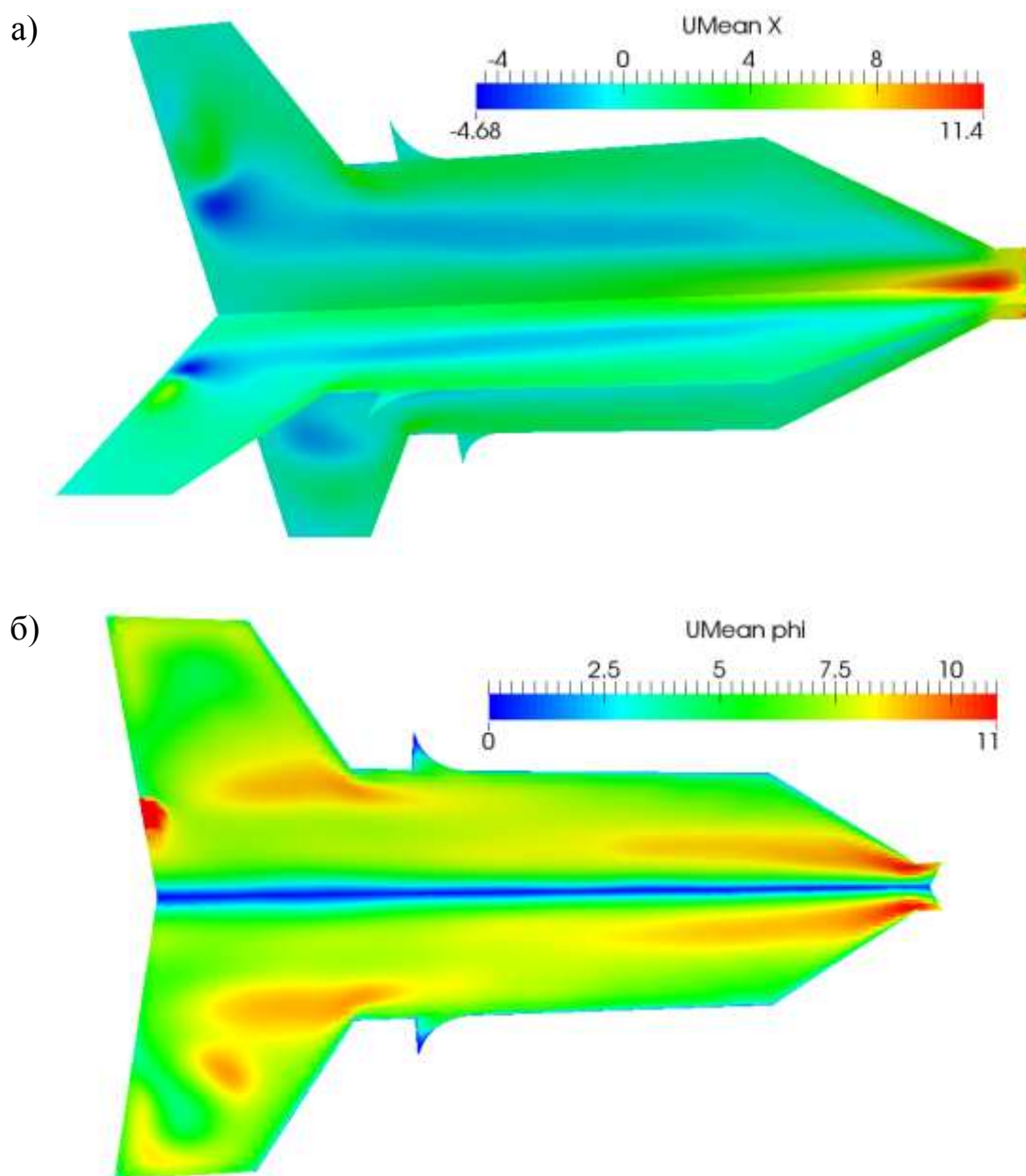
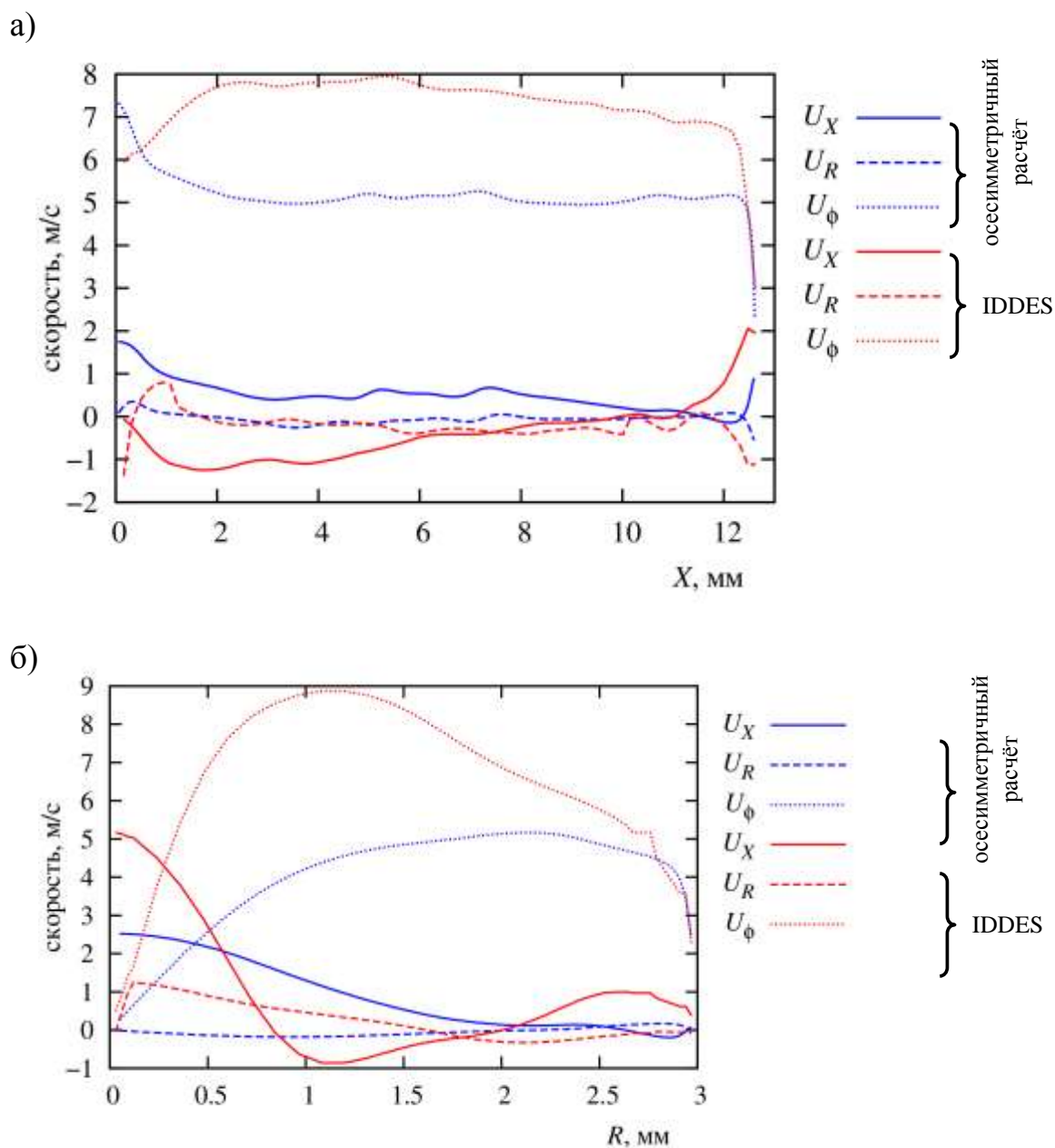


Рисунок 4.31 — Распределение осреднённой во времени скорости закрученного потока керосина в форсуночном модуле применительно к турбореактивному авиадвигателю :
а) осевая компонента; б) азимутальная компонента



Однако, несмотря на сильные различия в течении, средняя картина распределения объёмной плотности заряда в области в трехмерном случае сходна с таковой в осесимметричной постановке (см. рисунок 4.33).

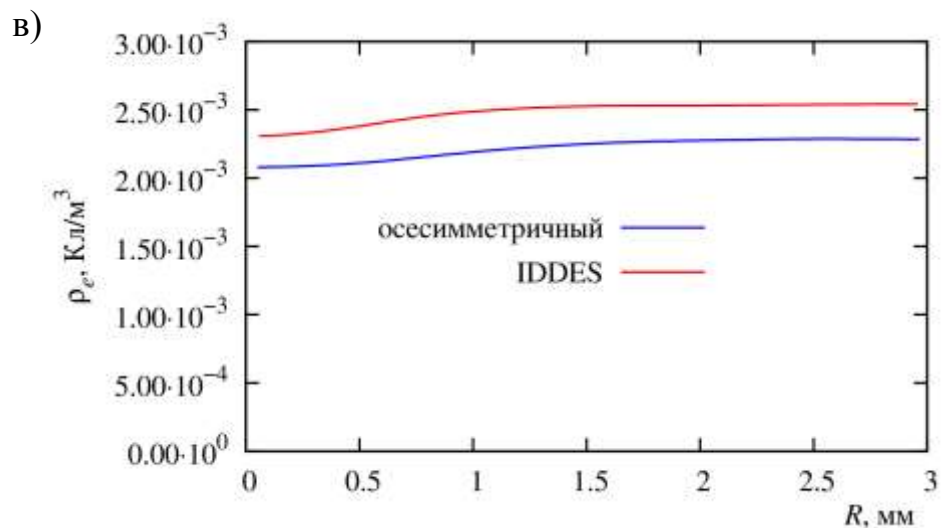
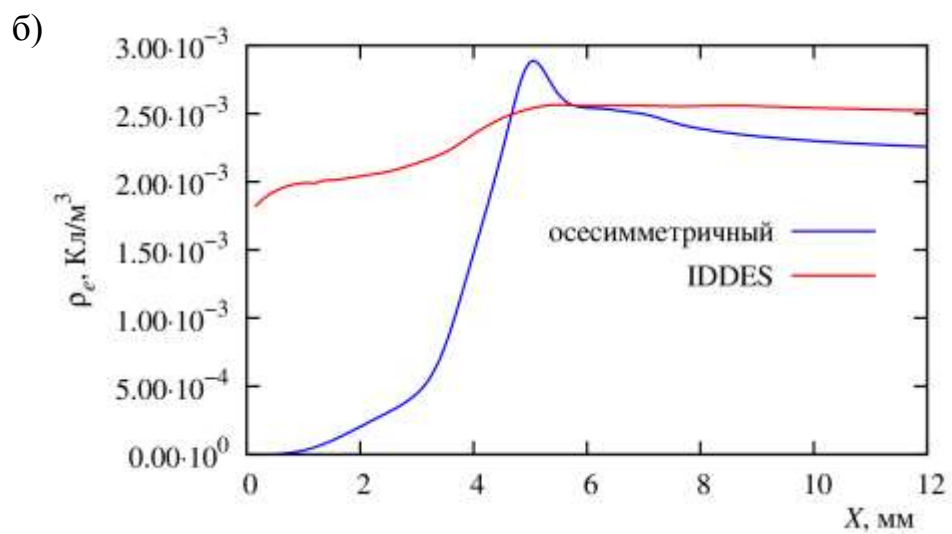
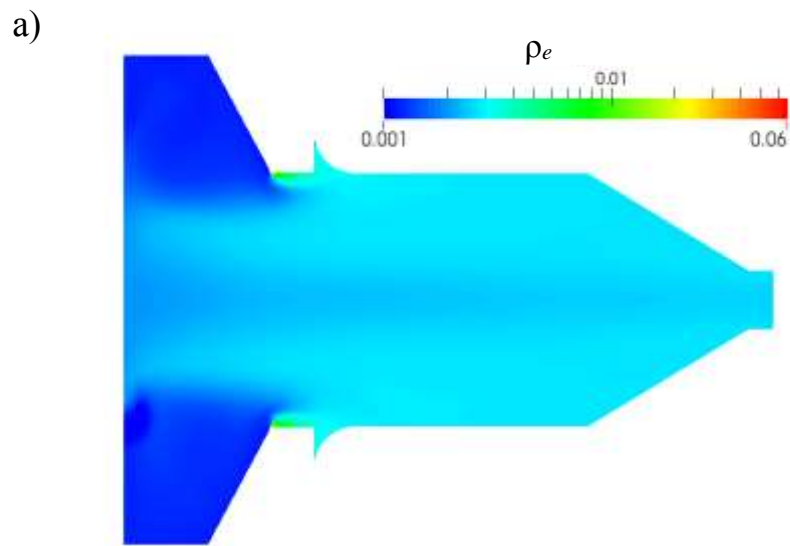


Рисунок 4.33 — Распределение плотности объёмной плотности электрического заряда ρ_e (в Кл/м³) в форсуночном модуле: а) общая картина (масштаб шкалы логарифмический); б) вдоль X при $R = 2$ мм; в) вдоль R при $X = 11$ мм

Как следует из рисунка 4.33, в большей части области трехмерный расчёт даёт сходную с осесимметричным случаем картину распределения объёмной плотности электрического заряда, за исключением области вблизи топливного завихрителя: здесь в трехмерном расчете наблюдается более сильное проникновение заряда.

В целом, за счёт более интенсивного турбулентного перемешивания в трехмерном случае объёмная плотность заряда в среднем по области оказывается примерно на 10% выше, чем в осесимметричном расчёте.

Поскольку наибольший интерес представляет количество электрического заряда, выносимого из форсуночного модуля, в таблице 4.4 приведены данные по среднему электрическому заряду и его току для разных моделей. Видно, что два трехмерных расчёта дают близкие результаты, тогда как осесимметричный расчёт даёт значения примерно на 10% ниже.

Таким образом, для более точного моделирования необходимо проводить расчёты в трехмерной постановке, однако, для оценки и анализа влияния различных факторов допустимо проводить расчёты и в осесимметричной постановке.

Таблица 4.4 — Ток ионов и среднее значение плотности объёмной плотности электрического заряда на выходе форсуночного модуля, полученные в разных расчётах при использовании ILES и IDDES

Расчёт	I , Кл/с	ρ_e , мКл/м ³
Осесимметричный	$2,48 \cdot 10^{-8}$	2,20
IDDES	$2,72 \cdot 10^{-8}$	2,44
ILES	$2,75 \cdot 10^{-8}$	2,46

Таким образом, исследованы процессы переноса электрического заряда, создаваемого электродной системой типа «игла — плоскость с отверстием», внутри модельного форсуночного модуля. Было установлено, что почти 80%

всего образующегося у игольчатого электрода заряда выносятся из форсуночного модуля.

Для исследования процесса распыла вытекающей из форсуночного модуля закрученной струи керосина, горения топливно-воздушной смеси а также влияние на эти процессы электрического заряда будут использованы разработанные математические модели влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капли керосина, апробированные численные ЭГД – модели и другие полученные результаты.

4.8 Выводы по разделу

1. Выполнен аналитический обзор литературы в области численного моделирования электрогидродинамических процессов в струях и потоках диэлектрических жидкостей. Разработаны математические модели воздействия электрических полей в электрокаплеструйных форсуночных модулях на закрученные потоки топлива (керосина) на основе системы уравнений электрогидродинамики. Проанализированы их применимость и возможности пакетов численного моделирования применительно к решению задач сообщения и распределения заряда в потоке топлива.

2. Проведен анализ физических моделей образования электрического заряда в закрученном потоке топлива в резко неоднородном электрическом поле в электрокаплеструйном форсуночном модуле и предложено для дальнейших численных исследований принять инжекционная модель.

3. Разработана модель электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивным авиационным двигателям, в котором электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки авиадвигателя, причем при снятии напряжения с электродов форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды работает как форсуночный модуль. Разработана (с позиций увеличения точности расчетов) методология численных исследований рассматриваемых процессов.

4. Проведено (с помощью открытого пакета OpenFOAM) численное

моделирование закрученного турбулентного течения керосина ТС-1 как без, так и с учётом электрогидродинамического взаимодействия. Показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение является осесимметричным и профили скорости закрученного потока топлива могут быть аппроксимированы гауссовым распределением.

5. Исследованы процессы переноса электрического заряда, создаваемого электродной системой типа «игла — плоскость с отверстием», внутри модельного электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю.

6. Проведён численный расчёт течения керосина ТС-1 в электрокаплеструйном форсуночном модуле в осесимметричном приближении с учётом переноса заряда. Показано, что течение топлива (керосина) является нестационарным, а за счёт интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки заряда достигает около 80% инжектируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный поток керосина.

7. Проведены численные исследования влияние расположения игольчатого электрода относительно изолирующей шайбы между цилиндрическими электродами форсуночного модуля и степени закрутки керосина в электрокаплеструйном форсуночном модуле на количество выносимого заряда закрученным потоком на выходе форсунки. Даны рекомендации по оптимизации конструкции форсуночного модуля применительно к турбореактивному авиационному двигателю.

8. Проведено трехмерное численное моделирование турбулентного течения в электрокаплеструйном форсуночном модуле с учётом топливного завихрителя с целью получения опорных данных при постановке входных граничных условий для осесимметричных электрогидродинамических расчётов без завихрителя. Показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение является практически осесимметричным, профили скорости непосредственно за завихрителем могут быть аппроксимированы к гауссовым распределениям.

9. Исследовано влияние различных вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности потока топлива в электрокаплеструйном форсуночном модуле на результаты численных расчетов. Выполнено трехмерное моделирование закрученного течения керосина ТС-1 в форсуночном модуле в резко неоднородном поле при помощи вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности (IDDES и ILES). Установлено, что при осесимметричном расчёте среднее количество заряда в потоке топлива на выходе из форсунки и электрический ток занижены примерно на 10% по сравнению с трехмерным моделированием.

10. Показано, что для более точного численного моделирования исследуемых процессов необходимо проводить расчёты в трехмерной постановке, однако, для оценки и анализа влияния различных факторов допустимо проводить расчёты и в осесимметричной постановке.

11. По результатам, полученным в данном разделе, опубликованы 2 статьи в иностранных и отечественных журналах, индексируемых в базе Scopus [1,2]. Полученные материалы исследований докладывались на Международных конференциях как за рубежом (Исландия), так и в России [14, 15].

**5 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО
РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПЕРЕНОСА
УНИПОЛЯРНОГО ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТОПЛИВО И РАСПЫЛА КЕРОСИНА
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГАЗОТУРБИНЫМ АВИАЦИОННЫМ
ДВИГАТЕЛЯМ. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ**

**5.1 Математические модели и методы численного расчета
электрогидродинамических процессов переноса униполярного
электрического заряда при работе ЭУВТ в цепи питания топливной
форсунки авиационных двигателей**

Как уже отмечалось в 3 главе настоящей диссертации, одним из разработанных методов повышения эффективности процессов распыла топлива и сгорания топливновоздушной смеси является метод, при котором ЭУВТ включается в цепь питания топливной форсунки непосредственно на входе топлива в форсунку. При этом можно использовать штатную (или доработанную) топливную форсунку авиадвигателя. Причем этот метод применим для любых типов авиационных двигателей (турбореактивных, газотурбинных). В этом случае форсуночный модуль состоит из собственно ЭУВТ и соответствующей топливной форсунки – в отличие от рассмотренного выше форсуночного модуля, когда ЭУВТ и топливная форсунка являются единым конструктивным элементом.

Объектом численных исследований являются процессы возникновения униполярного потока ионов в топливе и вынос заряда в ЭУВТ в поперечном к потоку керосина ТС-1 резко неоднородном электрическом поле.

Рассматривается поперечное к потоку топлива резко неоднородное поле в ЭУВТ и определена величина выносимого униполярного электрического заряда для базовых конструкций ЭУВТ.

На основании впервые проведенных экспериментальных исследований в Самарском аэрокосмическом университете по влиянию электрических полей на распыл керосина и горения керосиновоздушной смеси в модельной камере сгорания [6,8,9,24,41,154,156,157,159,162] применительно к авиационным двигателям выбрано базовое ЭУВТ.

Проточная часть базового ЭУВТ представляет собой цилиндрический канал, внутри которого помещена цилиндрическая спиралевидная щетка из игольчатых электродов, на которую подается электрическое напряжение с выхода электрической части ЭУВТ. Вторым электродом является корпус ЭУВТ, соединенный с «землей».

Внешний вид электрода типа «игла» и конструкция ЭУВТ представлены на рисунке 5.1 и рисунке 5.2

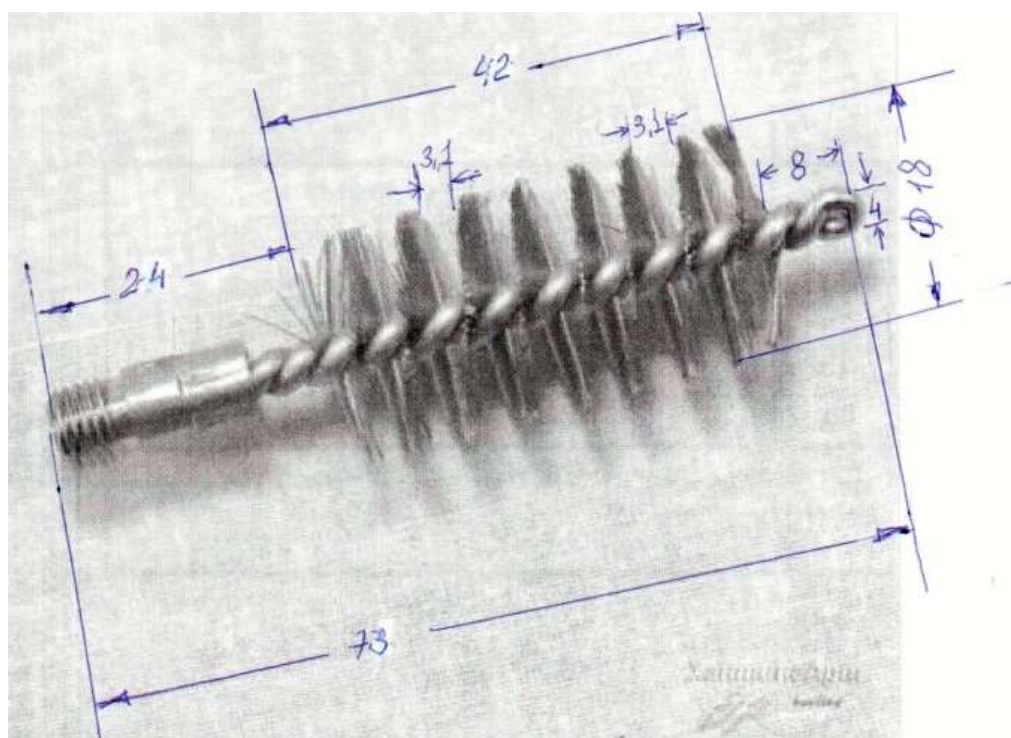


Рисунок 5.1 – Внешний вид щеточного электрода типа «игла» ЭУВТ

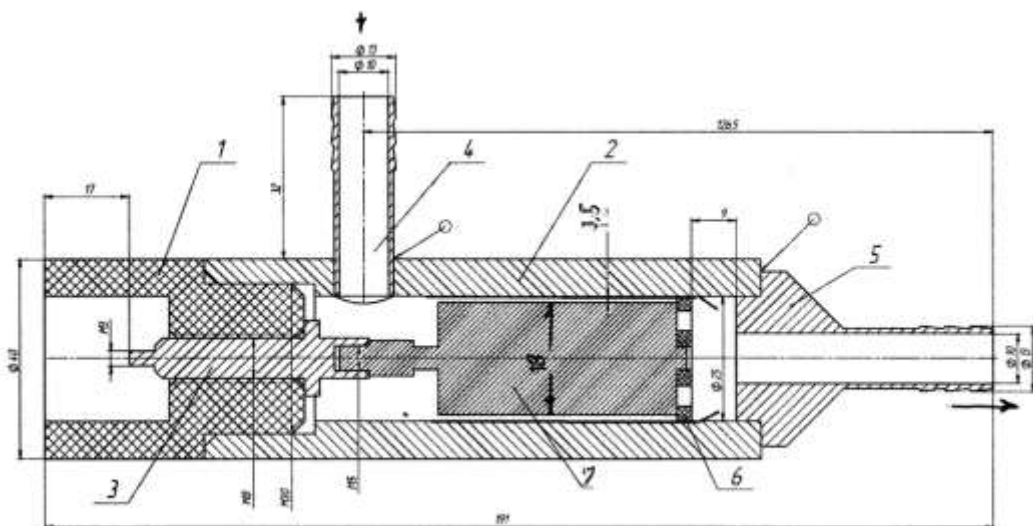


Рисунок 5.2 – Конструкция базового ЭУВТ

Для решения указанной выше электрогидродинамической задачи была создана упрощенная геометрическая модель проточного канала ЭУВТ, в которой щетка-электрод была заменена на игольчатые диски из однонаправленного пористого материала.

Гидравлическое сопротивление такой пористой среды определяется из соотношения

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = K \frac{\rho}{2} v^2 \quad (5.1)$$

где коэффициент гидравлических потерь K .

Данное число определяется через коэффициент гидравлического противления ξ как

$$K = \frac{\xi}{h}, \quad (5.2)$$

где h – толщина пористой стенки.

Согласно [313] коэффициент гидравлического сопротивления решеток можно принять равным $\xi = 1.6$, при этом, принимая толщину решетки $h = 0.1$ мм, для коэффициента потерь имеем:

$$K = 16000 \text{ 1/м} \quad (5.3)$$

Пористость материала задается как линейная функция, меняющаяся от центра диска к его краю от 0% до 70%.

Вид численной геометрической модели исследуемого ЭУВТ представлен на рисунке 5.3 [13].

Диаметр стержня d при этом принимался равным 4 мм, диаметр дисков $d_2 = 18$ мм, всего 9 дисков толщиной 0,1мм, расстояние между дисками 5.25 мм. Общая длина расчетной области 80 мм.

На электрод 1 (синий цвет) подается положительный потенциал $U = 5000$ В. Электрод 2 (красный цвет) заземлен (имеет нулевой потенциал). Массовый расход керосина на входе в канал = 0.00725 кг/с.

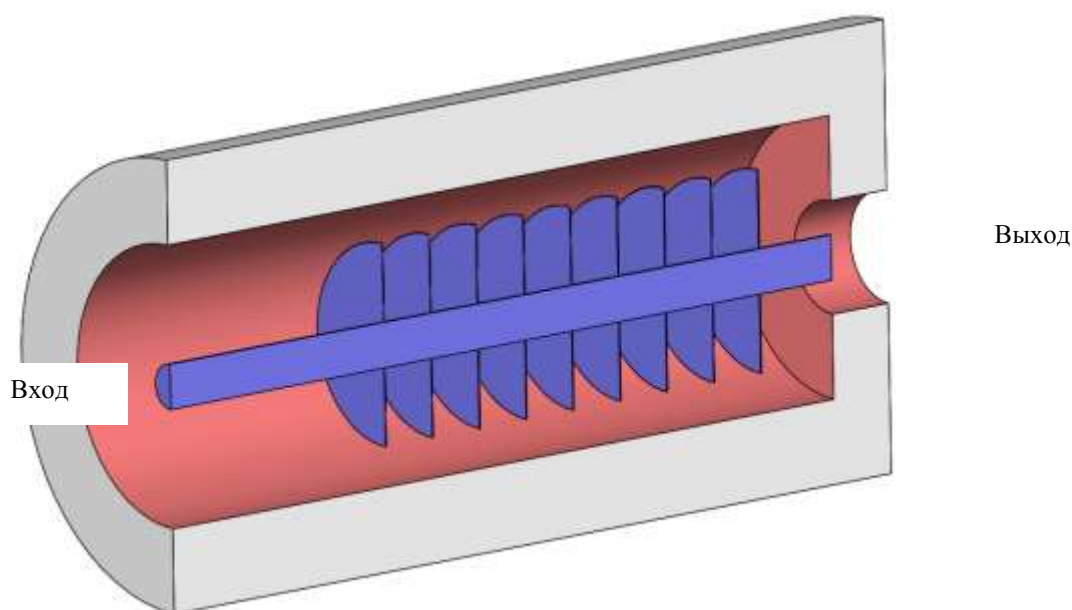


Рисунок 5.3 – Численная геометрическая модель электрического устройства воздействия на топливо в цепи гидравлического питания топливной форсунки авиационного двигателя

В результате образования резко неоднородного электрического поля вблизи края диска с большой электрической напряженностью с поверхности такого игольчатого диска происходит инжекция положительно заряженных ионов.

Данные униполярные ионы под действием электрических сил двигаются к противоположному электроду, захватываются потоком керосина и поступают в форсунку.

Для моделирования данного электрогидродинамического процесса была разработана расчетная численная модель [13].

Для описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в изотермической несжимаемой жидкости (в потоке керосина) использовались основные уравнения электрогидродинамики (2.34) – (2.38)

В качестве модели образования униполярных ионов с концов игольчатых электродов используется инжекционная модель (2.32), (2.33) с соответствующими коэффициентами инжекции A и B [13].

Что касается граничного условия для зарядов на противоположном электроде в виде цилиндрической поверхности, полагается, что поток ионов через нее равен нулю.

Свойства рабочей жидкости в расчетах соответствуют свойствам керосина ТС-1: плотность $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$, динамический коэффициент вязкости $\mu = 1.014 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.2$.

Подвижность ионов в жидкости бралась равной $b_i = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, ионный коэффициент диффузии $D = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

По всем границам, отвечающим непроницаемым стенкам ставится условие равенства нулю всех компонент вектора скорости.

Расчет проводился в пакете численного моделирования ANSYS/CFX на основе метода контрольных объемов. Расчеты проводились в квазиосесимметричной постановке.

Разработанная расчетная сетка для осесимметричного сечения приведена на рисунке 5.4.

При численном моделировании использовалась структурированная гексагональная сетка со сгущением в области края диска. Расчетная область представляет сектор в 5 градусов. Общее количество ячеек составляет $\sim 9\,400\,000$.

Для учета пограничного слоя введено сгущение на границах непроницаемых стенок. Эффект турбулентности моделируется с использованием SST модели.

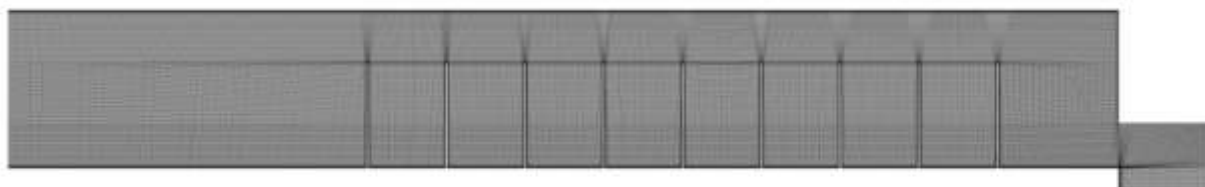


Рисунок 5.4 – Расчетная сетка для численного моделирования переноса заряда в электрическом устройстве воздействия на топливо

При моделировании исследовалась величина электрического заряда в керосине на выходе из ЭУВТ при постоянном напряжении $U = 5$ кВ.

Для выполнения данных расчетов использовался пакет численного моделирования задач гидрогазодинамики ANSYS/CFX. Следует отметить, что среди встроенных в пакет уравнений нет уравнений, позволяющих моделировать электрогидродинамическое поведение жидкости в электрическом поле. Поэтому для решения поставленной задачи система уравнений Навье-Стокса (2.34), (2.35) и уравнения Пуассона для электрического потенциала (2.35,а) была дополнена законом Нернста-Планка (2.36)-(2.38) и дополнительными соотношениями электродинамики.

Для возможности получения совместного решения использовалась итерационная процедура и явный метод решения по времени в результате которой на каждом шаге по времени последовательно решались уравнения гидродинамики и электродинамики.

Алгоритм решения системы уравнений электрогидродинамики применительно к ЭУВТ представлен на рисунке 5.5.

Результаты полученных характеристик расчетных величин представлены в виде картин распределений объемной плотности электрического заряда, давления

и модуля вектора скорости в продольном сечении канала. Для наглядности распределения приведены с учетом отражения от горизонтальной плоскости.

Распределение объемного заряда в канале ЭУВТ представлено на рисунке 5.6.

В рамках принятой упрощенной расчетной модели и граничных условий, величина объемной плотности электрического заряда на выходе ЭУВТ оказалась равной ≈ 0.00146 Кл/м³.



Рисунок 5.5 – Алгоритм численного решения электрогидродинамической задачи переноса электрического заряда в ЭУВТ в цепи питания форсунки авиационного двигателя

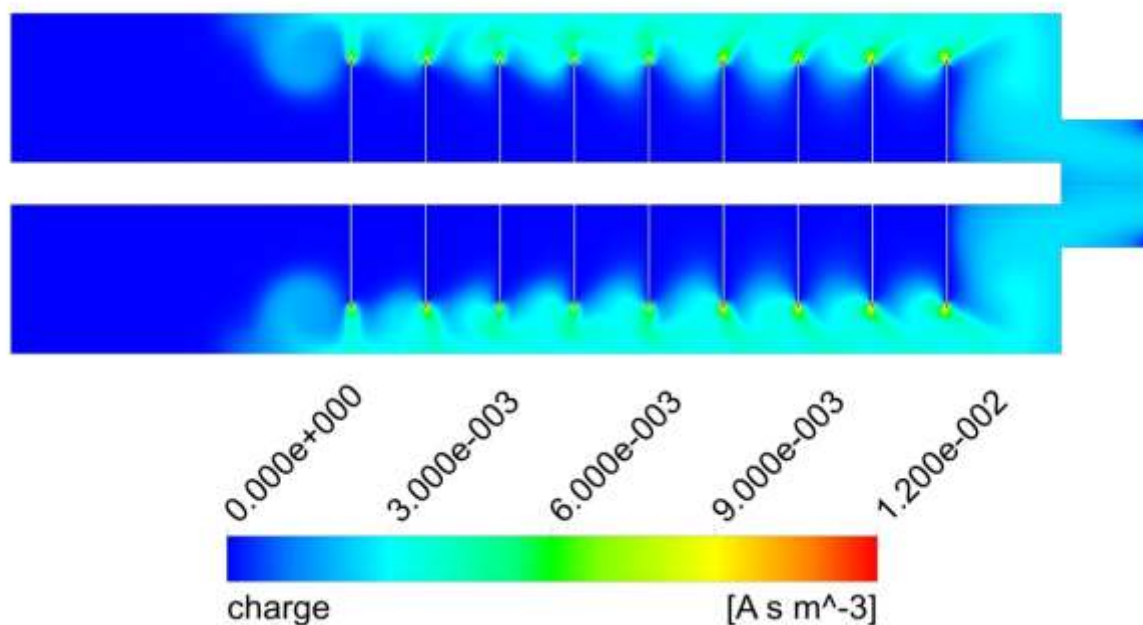


Рисунок 5.6 – Распределение объемного заряда в канале электрического устройства воздействия на топливо для $U=5$ кВ при включении ЭУВТ в цепь питания форсунки авиационного двигателя

Однако данная оценка инжектируемого с электрода типа «игла» заряда в ЭУВТ имеет заниженный характер в виду того, что расчетная модель имеет ряд геометрических упрощений. Несмотря на это, полученный результат показывает, что данный метод встраивания ЭУВТ в топливную систему питания форсунки позволяет сообщать потоку керосина униполярный электрический заряд.

Ниже приведены результаты численного анализа работы данного ЭУВТ (см. рисунок 5.1 и рисунок 5.2) при другой расчетной модели межэлектродного промежутка. Приведена также сравнительная оценка результатов численных расчетов процессов переноса электрического заряда в различных базовых конструкциях ЭУВТ в цепи питания топливной форсунки и в электропневматической форсунке (ЭПФ). В последнем случае ЭУВТ непосредственно конструктивно реализуется в самой топливной форсунке и составляет единый (в конструктивном отношении) модуль.

5.2 Теоретические модели и численные расчеты электрокаплеструйных форсуночных модулей с резко неоднородными электрическими полями в цепях подачи топлива и в самой электропневматической форсунке применительно к газотурбинным авиационным двигателям

Разработаны уточненные численные модели образования и переноса электрического заряда потоком углеводородного топлива в базовом ЭУВТ, включенных в цепь питания форсунки, и в электропневматической форсунке с использованием уточненной инжекционной модель образования униполярного электрического заряда в углеводородном топливе (керосине) в резко неоднородном электрическом поле.

5.2.1 Численное моделирование электрогидродинамического процесса сообщения и переноса электрического униполярного заряда в потоке топлива (керосина) в форсуночных модулях

5.2.1.1 Теоретическая модель описания электрогидродинамических процессов в форсуночных модулях. Численные решения в ANSYS CFX

Для выполнения расчётов течения топлива и сообщения ему электрического заряда использовался вычислительный комплекс ANSYS CFX.

Применительно к рассматриваемой задаче перепишем основные ЭГД уравнения (4.1) – (4.5), используемые для описания турбулентного течения и переноса униполярного заряда в изотермической несжимаемой рабочей жидкости, в виде:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (5.4)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{U}\vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left((\mu + \mu_t) \nabla \vec{U} \right) + \rho_e \vec{E}, \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_e \vec{U} + b_i \rho_e \vec{E} - \left(D_i + \frac{\mu_t}{\rho S c_t} \right) \nabla \rho_e \right) = 0, \quad (5.6)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_e}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (5.7)$$

$$\vec{E} = -\nabla \varphi, \quad (5.8)$$

где \vec{U} – вектор скорости среды, ρ – плотность среды, p – давление, μ и μ_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, ρ_e – объемная плотность заряда, \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, φ – потенциал электрического поля, b_i – подвижность электронов в жидкости, D_i – ионный коэффициент диффузии, $S c_t$ – турбулентное число Шмидта для ионов, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная. В связи с тем, что турбулентное число Шмидта для ионов неизвестно, используется аналогия между турбулентным переносом ионов и турбулентным переносом примеси, для которой по умолчанию $S c_t = 0,9$.

Для замыкания данной системы используются граничные условия, и модель турбулентности.

Информация о граничных условиях будет приведена ниже отдельно для каждой решаемой задачи.

В расчётах течения топлива в электрическом устройстве воздействия на топливо и электропневматической форсунке использовалась k - ε модель турбулентности, в которой используются уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon), \quad (5.10)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1$ и

$\sigma_\varepsilon = 1,3$, P_k – член, отвечающий за генерацию турбулентности за счёт вязких сил:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right), \quad (5.11)$$

В качестве модели образования униполярных ионов с концов игольчатых электродов используется инжекционная модель (2.32), (2.33) с ранее уточненными коэффициентами инжекции для керосина в резко неоднородном электрическом поле: $A=2,25 \cdot 10^{-10}$ Кл/(В·м·с), $B=0,6 \cdot 10^{-3}$ Кл/(м²·с).

В ANSYS CFX для решения уравнений (5.4) – (5.11), (2.33) используется метод контрольных объемов. Расчётная сетка используется для построения контрольных объемов, которые используются для сохранения массы, импульса и энергии.

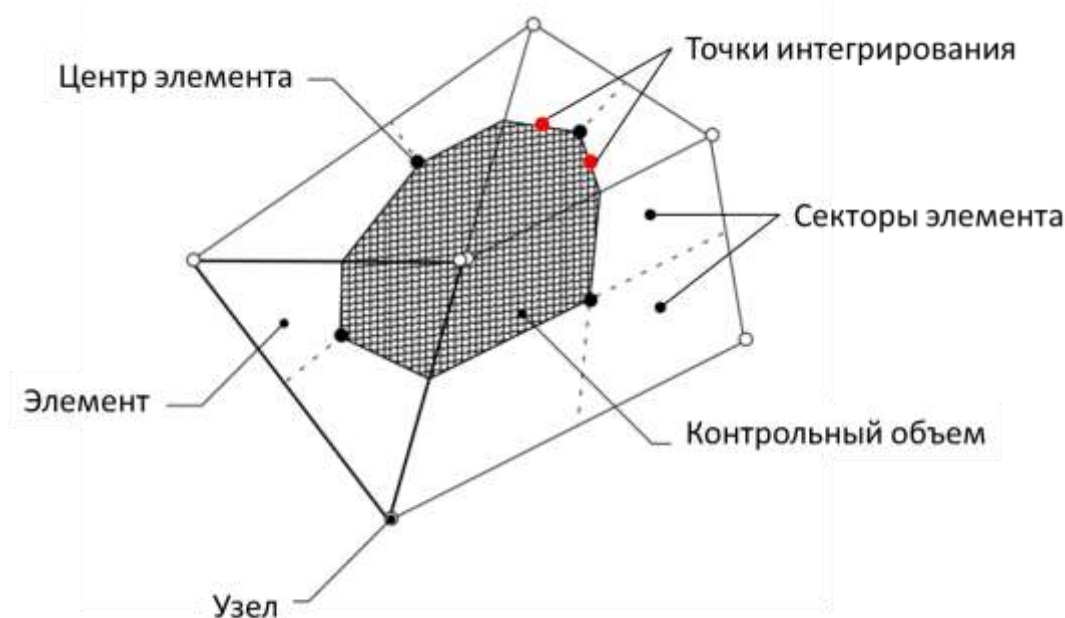


Рисунок 5.7 – Контрольный объем и точки интегрирования в ANSYS CFX при расчете процесса переноса электрического заряда в электрокаплеструйных форсуночных модулях

На рисунке 5.7 представлена типичная двумерная сетка. Все переменные и свойства жидкости определены в её узлах. Контрольный объем (закрашенная область) создается вокруг каждого из узлов, используя центры элементов и центры ребер существующей сетки.

Уравнения математической модели интегрируются по каждому контрольному объему, после чего используется теорема Остроградского-Гаусса для преобразования объемных интегралов в поверхностные. Объемные интегралы дискретизируются для каждого сектора элемента и суммируются для контрольного объема, которому принадлежат. Поверхностные интегралы дискретизируются в точках интегрирования, расположенных в центрах каждого поверхностного элемента, после чего распределяются по контрольным объемам. Поскольку поверхностные интегралы получаются равны и противоположны по знаку для соседних контрольных объемов, обеспечивается локальная консервативность



Рисунок 5.8 – Схема выполнения расчета при расчете процесса переноса электрического заряда электрокаплеструйных в форсуночных модулях в ANSYS

решения. В данной задаче использовалась численная схема первого порядка точности, в которой значения переменных в точках интегрирования принимаются равными значениям в узлах, расположенных выше по потоку.

Расчёты выполнялись по схеме, представленной на рисунке 5.8.

Для оценки влияния воздействия электрических полей на процесс распыла топлива необходимо определить величину заряда, сообщаемого потоку топлива (керосина). Применительно к газотурбинным авиадвигателям ниже рассматриваются два метода сообщения униполярного заряда топливу в резко неоднородном поле - в базовом ЭУВТ в топливной магистрали перед форсункой, а также непосредственно в разработанной электропневматической форсунке.

5.2.1.1.1 Численное моделирование процессов создания и переноса электрических зарядов в ЭУВТ в цепи питания форсунки газотурбинного авиационного двигателя

Моделируются электрогидродинамические процессы в ЭУВТ, конструкция которого представлена на рисунках 5.1 и 5.2.

Среднее количество игольчатых электродов на один оборот щетки составляет 150. Толщина каждого игольчатого электрода составляет 0,1 мм.

Для описания течения керосина вокруг игольчатых электродов и между ними необходимо использовать элементы расчетной сетки с размерами на порядок меньше диаметра одного игольчатого электрода, длина которых примерно в 70 раз больше их диаметра, поэтому для численного моделирования была построена упрощенная модель сектора ЭУВТ в 12° . Модель сектора внутреннего электрода представлена на рисунке 5.9, она включает в себя 14 рядов игольчатых электродов по 5 штук в каждом. Игольчатые электроды расположены по длине с постоянным шагом.

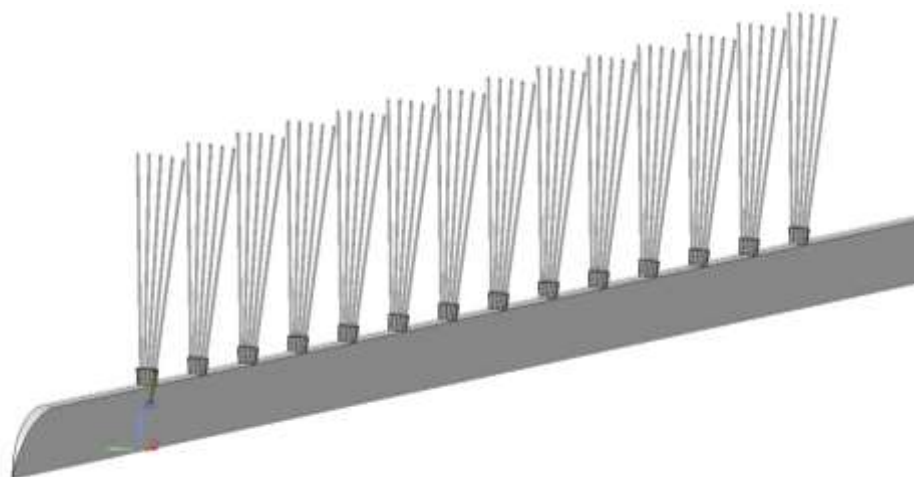


Рисунок 5.9 – Расчетная модель игольчатых электродов ЭУВТ, включенного в топливную магистраль перед форсункой газотурбинного авиационного двигателя

Для выполнения электрогидродинамических численных расчётов ЭУВТ были построены неструктурированные расчётные сетки, в которой для детального описания процесса инжекции заряда было организовано сгущение вблизи активного

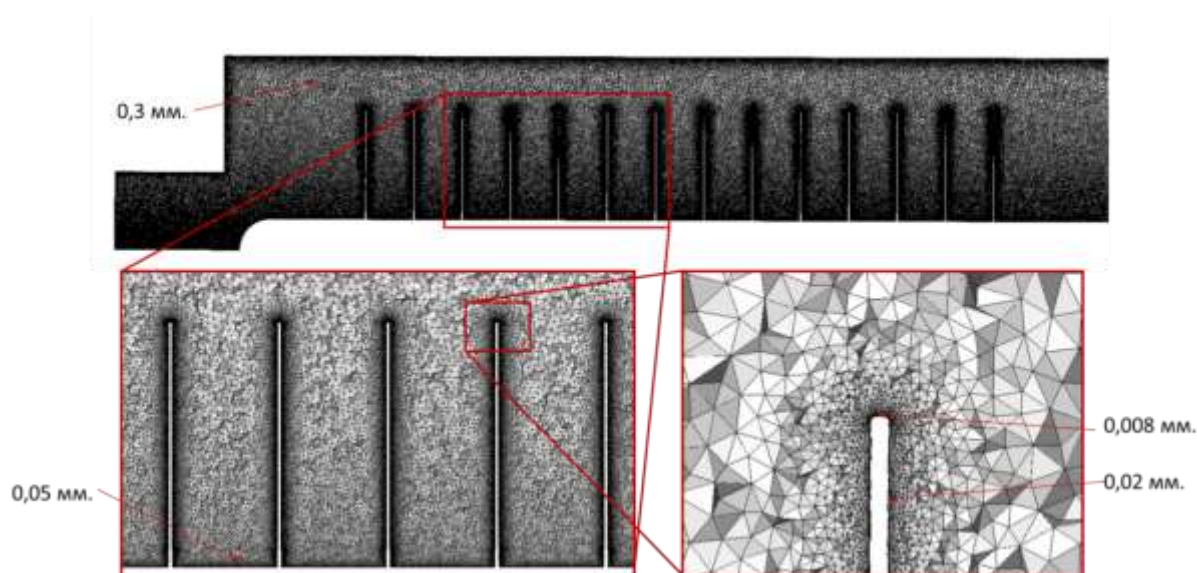


Рисунок 5.10 – Расчётная сетка ЭУВТ, включенного в топливную магистраль перед форсункой газотурбинного авиационного двигателя

игольчатого электрода. Продольное сечение сетки ЭУВТ с размерами элементов в различных областях представлено на рисунке 5.10. Вблизи стенок было создано 5 слоев призматических элементов.. Параметры сетки приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры расчётных сеток ЭУВТ

ЭУВТ	Количество тетраэдров, шт.	Количество призм, шт.	Количество узлов, шт	Минимальное качество элемента
	39 461 358	10 319 670	12 551 900	0,02

В расчёте моделировался рабочий процесс в ЭУВТ при испытаниях по определению воздействия электрического тока на характеристики распыла капель в форсуночном модуле газотурбинного авиационного двигателя.

На рисунке 5.11 представлены области задания граничных условий для рассматриваемого ЭУВТ, включенного в цепь питания на входе топлива в форсунку. . Одна из боковых стенок не показана.

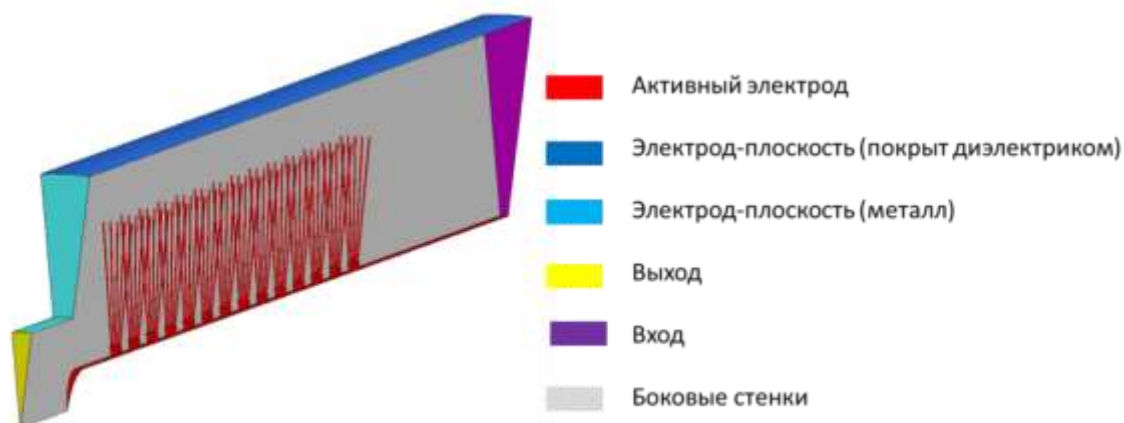


Рисунок 5.11 – Граничные условия для численного расчёта ЭУВТ , включенного в топливную магистраль перед форсункой газотурбинного авиационного двигателя

На всех поверхностях, кроме боковых стенок, задавалось условие прилипания потока. На входе – расход топлива 0,00022633 кг/с, равный 1/30 от расхода топлива через форсунку при проведении испытаний, так как

использовался сектор 12° . Также определялся нулевой поток электрического поля и нулевое значение объемной плотности заряда. На выходе задавалось давление 2 атм., соответствующее давлению на входе в форсунку. На игольчатом активном электроде задавался постоянный электрический потенциал 5000 В и инжекция заряда, согласно выражению (2.33) с уточненными коэффициентами инжекции.

Противоположный электрод ЭУВТ типа «плоскость» состоял из двух частей: на цилиндрической поверхности, покрытой диэлектриком, задавался нулевой поток заряда, а на двух других (металлических) – условие нейтрализации заряда. Для обеих частей потенциал электрического поля равнялся нулю.

В связи с тем, что иглы (щетинки) активного электрода были расположены по спирали, боковые стенки были не периодичны, поэтому на них задавалось условие скольжения потока, а также нулевые потоки заряда и электрического поля.

Расчёты выполнялись в стационарной постановке с шагом по времени 0,00005 с. При этом использовался весовой коэффициент для постепенного увеличения инжекции ионов для предотвращения расхождения расчёта. В течение первых 200 итераций, пока устанавливалось течение керосина внутри ЭУВТ, данный коэффициент был равен нулю, после чего постепенно увеличивался до 1 в течение 2000 итераций.

Для рассматриваемого ЭУВТ после 3000 итераций шаг по времени был увеличен до 0,0001 с.

В процессе расчёта отслеживалась осреднённая по массовому расходу объемная плотность электрического заряда на выходе из ЭУВТ. Было установлено, что 6000 итераций достаточно для получения установившегося решения.

На рисунке 5.12 представлены результаты расчёта сообщения заряда топливу в ЭУВТ. Представлены продольные поля скорости, электрического потенциала и объемной плотности электрического заряда.

Полученные результаты говорят о том, что большая часть топлива протекает над активным электродом в виде игл-щетинок. С концов щетинок игольчатого

электрода происходит инжекция электрического заряда в поток керосина, который (заряд) движется по направлению к противоположному электроду и сносится потоком топлива. На поле скорости видно, что движение заряженных частиц сопровождается отклонением потока топлива от осевого направления в сторону внутренней поверхности цилиндрического электрода. В связи с большим градиентом электрического потенциала вблизи центрального тела активного электрода, напряженность поля вблизи его торца достигает величины $2 \cdot 10^6$ В/м, несмотря на большой радиус закругления. В результате, с кромки центрального тела также происходит инжекция заряда в поток.

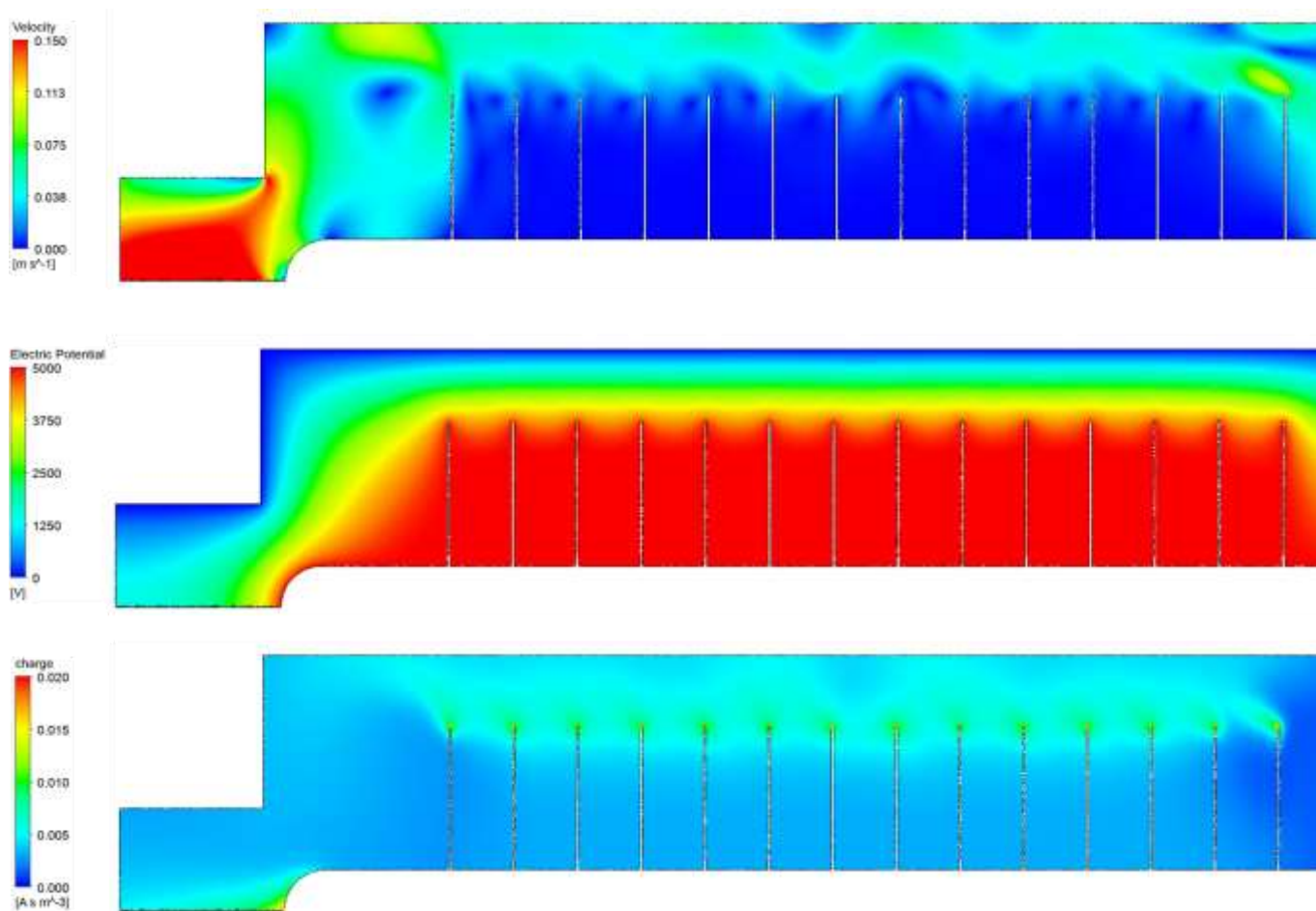


Рисунок 5.12 – Продольные поля скорости керосина (вверху), электрического потенциала (посередине) и объемной плотности заряда (внизу) в ЭУВТ, включенного в топливную магистраль перед форсункой газотурбинного авиационного двигателя

На рисунке 5.13 показаны поля напряженности электрического поля и объемной плотности заряда с наложенными векторами скорости в пространстве между электродами.

Согласно векторному полю скорости после инъекции заряда с концов активного электрода заряд начинает движение к противоположному электроду, но из-за образования циркуляционного течения между рядами щетинок, часть заряда вместе с потоком уносится к оси ЭУВТ.

В результате данного расчёта было установлено, что большая часть заряда выносится из ЭУВТ вместе с топливом, объемная плотность на выходе составляет $0,0034 \text{ Кл/м}^3$. Данная величина будет впоследствии использоваться для расчёта изменения коэффициента поверхностного натяжения капель топлива при расчете распыла топлива форсуночным модулем (ЭУВТ + Топливная форсунка газотурбинного авиадвигателя).

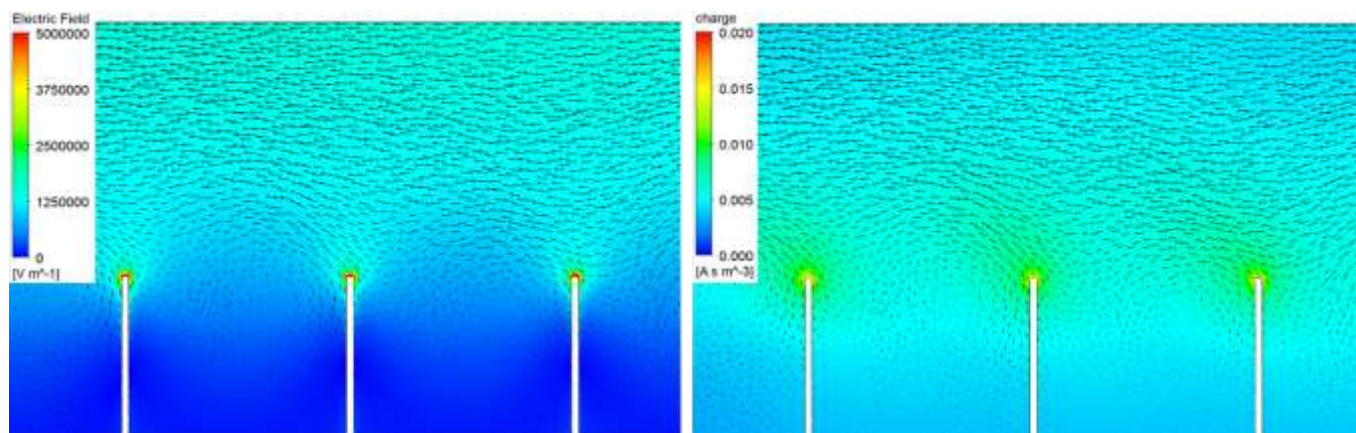


Рисунок 5.13 – Напряженность электрического поля (слева) и объемная плотность заряда (справа) в пространстве между электродами

5.2.1.1.2 Численное моделирование процессов создания и переноса электрических зарядов в электропневматической форсунке газотурбинного авиационного двигателя

Рассмотрим впервые в мире разработанную с позиций динамического конструирования [21,22] и изготовленную (рисунок 5.14) [42] электропневматическую форсунку (ЭПФ) для газотурбинного авиадвигателя типа ПД-14, в которой ЭУВТ и топливная форсунка является единым конструктивным элементом (см. рисунки 3.3, 3.4, рисунки 3.6, 3.7).

Как было отмечено в 3 главе настоящей диссертации, в разработанной ЭПФ для создания резко неоднородного электрического поля электрод типа «игла» выполнен выходной острой кромки (см. рисунок 3.4, рисунок 3.7).

В качестве острой кромки служит тонкий слой токопроводящего вольфрамового напыления на керамической проставке (рисунок 5.15).



Рисунок 5.14 – Впервые изготовленная принципиально новая электропневматическая форсунка с электрическим полем для газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14

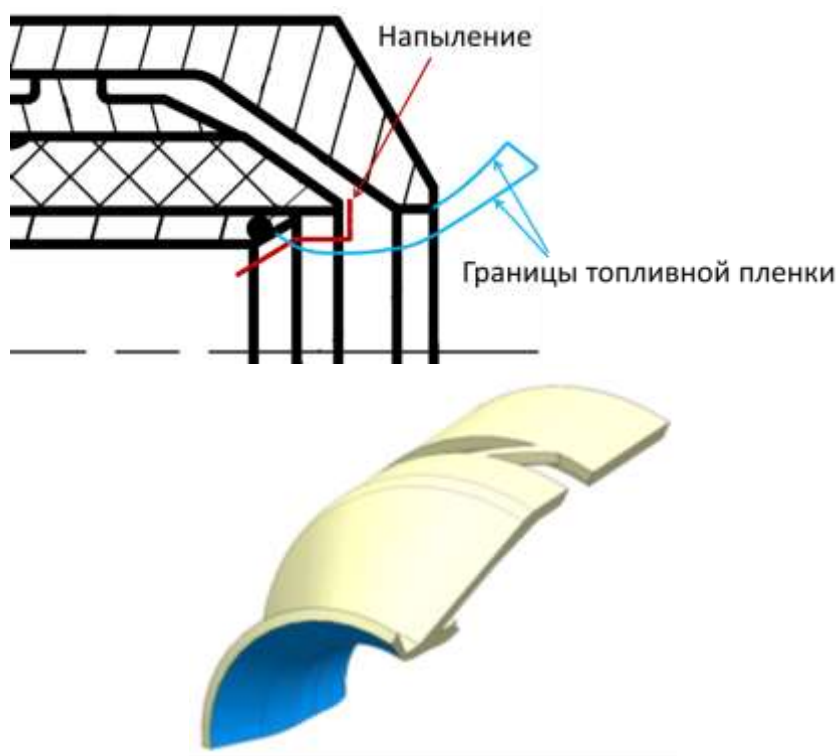


Рисунок 5.15 – Область напыления тугоплавкого металла для создания резко неоднородного поля в электропневматической форсунке газотурбинного авиадвигателя (слева) и модель расчётной области (справа)

Поскольку толщина напыления составляет всего 2 мкм., при подаче напряжения вблизи его кромки будет создаваться резко неоднородное электрическое поле, в котором при подаче электрического напряжения на электроды ЭПФ инжектируется в топливо униполярный поток ионов знака острого электрода.

Для выполнения расчёта течения топлива и сообщения ему униполярного электрического заряда была создана модель, включающая в себя внутренние топливные каналы электропневматической форсунки и область, в которой распространяется топливная пленка после истечения из неё.

Границы топливной пленки были определены по результатам расчёта течения топлива ранее описанным методом VOF. На рисунке 5.15 эти границы выделены синим цветом.

Для сокращения затрат вычислительный ресурс модель включала в себя сектор 120° .

В расчётах были заданы уточнённые значения коэффициентов инжекционной модели (2.33): $A=2,25 \cdot 10^{-10}$ Кл/(В·м·с), $B=0,6 \cdot 10^{-3}$ Кл/(м²·с).

Свойства рабочей жидкости (керосина), подвижность ионов, ионный коэффициент диффузии соответствовали значениям, указанным выше.

В пространстве между электродами возникает большой градиент напряженности электрического поля с максимальным его значением возле острой кромки игольчатого электрода ЭПФ, достигающей 10 МВ/м. Заряд, инжектируемый с его поверхности, уносится потоком топлива.

Для выполнения расчёта ЭПФ была построена неструктурированная тетраэдральная сетка с семью слоями призматических элементов (рисунок 5.16) на стенках форсунки. Было создано сгущение сетки вблизи острого конца напыления для точного описания электрогидродинамических процессов в данной области. Параметры расчетной сетки приведены в таблице 5.2.

В расчёте моделировались условия испытания форсунок на стенде АО «ОДК – Авиадвигатель» по определению параметров распыла топлива. Расход через форсунку равнялся 0,0167 кг/с. На электродах ЭПФ в данном расчёте задавалось электрическое напряжение 3500 В.

На рисунке 5.17 представлены области задания граничных условий для расчёта электрогидродинамических процессов в ЭПФ.

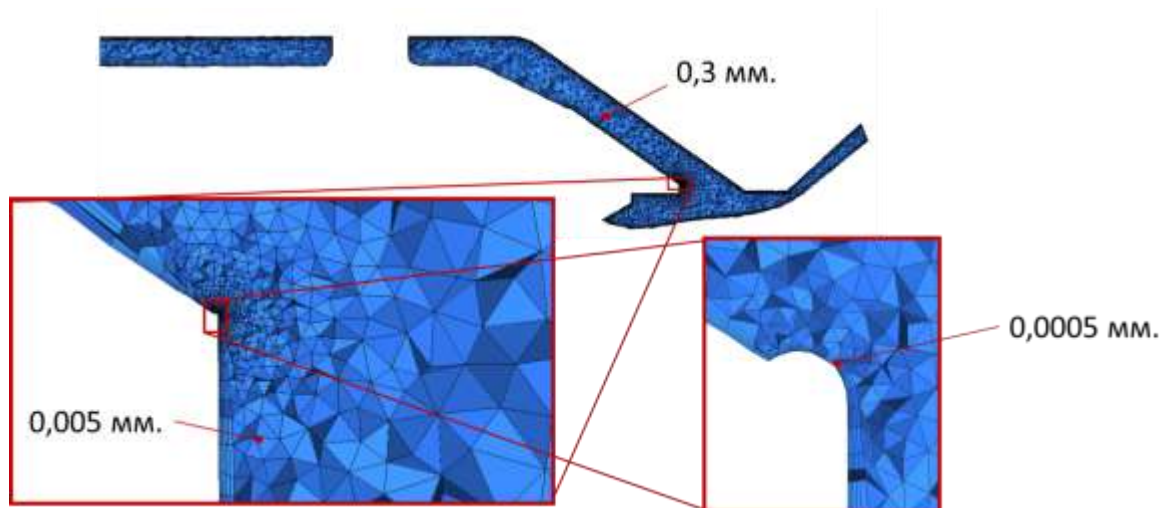


Рисунок 5.16 – Расчётная сетка электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя

Таблица 5.2 – Параметры расчётной сетки электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя

Параметр	Количество тетраэдров, шт.	Количество призм, шт.	Количество узлов, шт.	Минимальное качество элемента
Значение	6 535 907	2 019 395	2 210 887	0,05

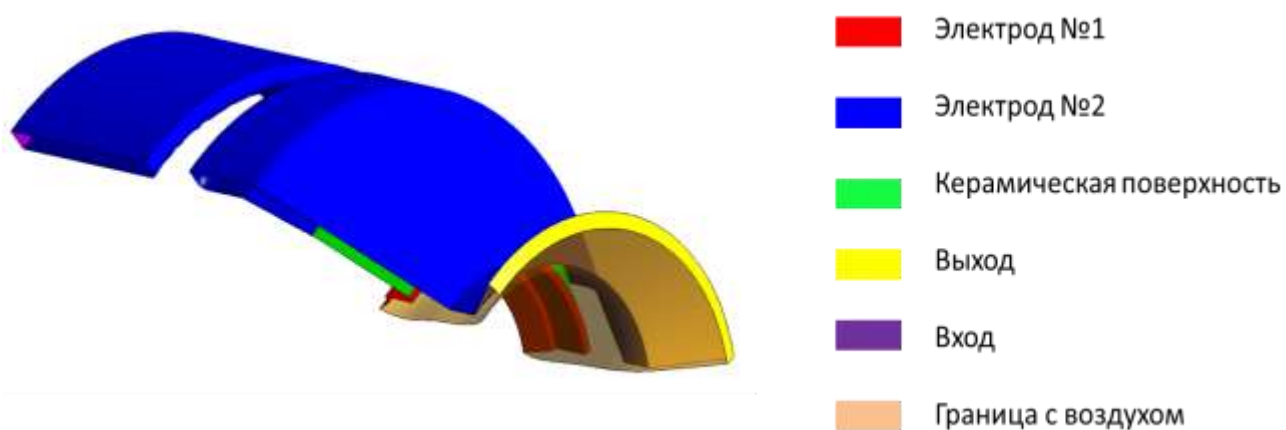


Рисунок 5.17 – Граничные условия для расчёта электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя

На игольчатом электроде (активном) задавался постоянный электрический потенциал, в инжекционной модели, согласно выражению (2.33), использовались

уточнённые выше коэффициентами A и B . На противоположном (заземленном) электроде задавалось условие нейтрализации электрического заряда и нулевой электрический потенциал. На керамической поверхности и границах с воздухом задавались нулевые потоки заряда и электрического поля. Принималось, что передача электрического заряда от жидкого топлива к окружающему воздуху отсутствует. На входе ЭПФ был задан расход керосина $0,005567$ кг/с с нулевой объемной плотностью электрического заряда. На выходе ЭПФ принималось статическое давление 1 атм. На стенках ЭПФ использовалось условие прилипания потока топлива, на границах с воздухом – свободное скольжение. На границах периодичности задавались консервативные потоки массы, электрического поля и заряда.

Так же, как и в расчёте ЭУВТ, свойства рабочей жидкости (керосина), подвижность ионов, ионный коэффициент диффузии соответствовали значениям, указанным выше.

Расчёт выполнялся в стационарной постановке с шагом по времени $0,00002$ с, в течение первых 200 итераций потенциал на активном электроде был равен нулю, после чего в течение 800 итераций постепенно увеличивался до 3500 В, чтобы предотвратить расхождение расчёта из-за резкого появления большого заряда вблизи кромки острого напыленного электрода. Итоговая длительность расчёта составила 4000 итераций.

На рисунке 5.18 представлены линии тока топлива в расчётной области, из которых видно, что после выхода из паза ЭПФ керосин приобретает большую окружную скорость.

На рисунке 5.19 показаны продольное поле скорости с нанесёнными линиями тока и поле электрического потенциала в ЭПФ.

Данные результаты показывают, что в пространстве между стенкой внутреннего канала электропневматической форсунки и границей воздух-топливо образуется застойная зона, в которую попадает топливо, движущееся вдоль внутренней поверхности кольцевого канала ЭПФ.

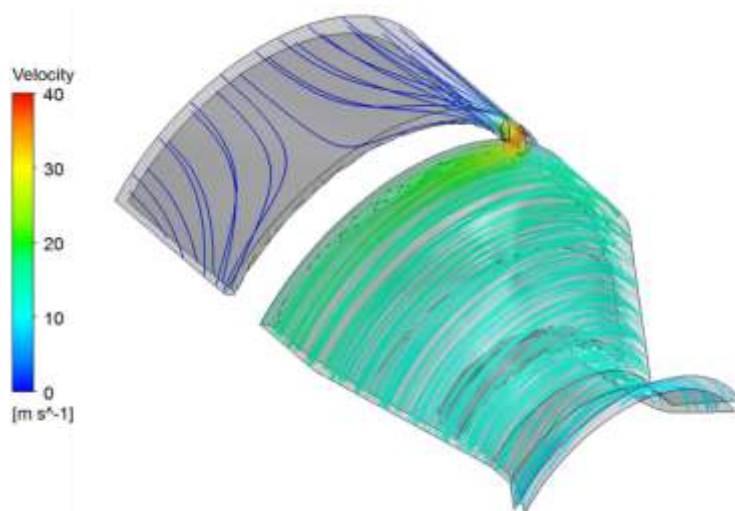


Рисунок 5.18 – Линии тока керосина в расчетной области электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя

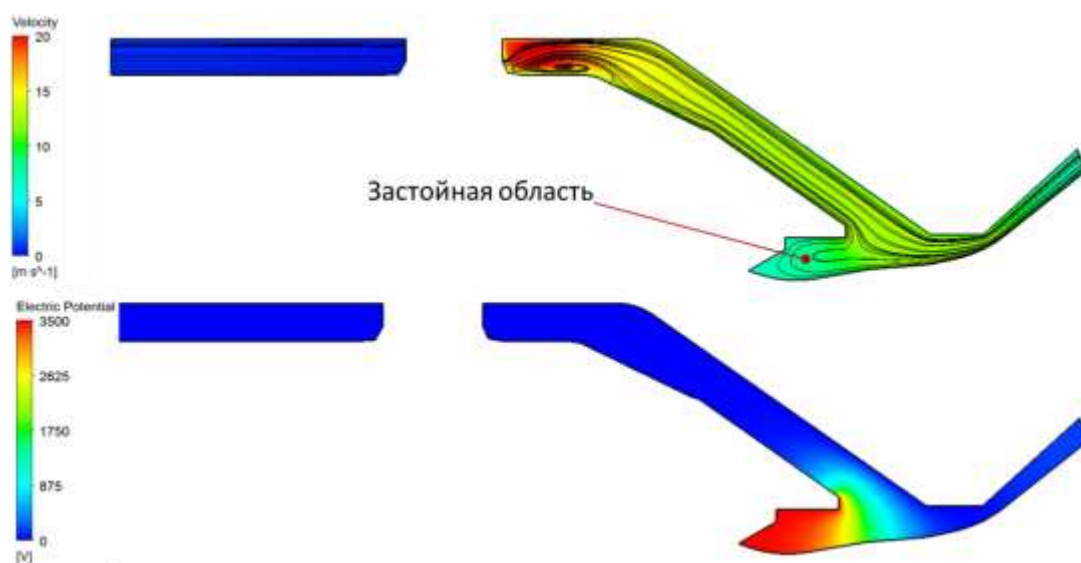


Рисунок 5.19 – Продольное поле скорости (вверху) и электрического потенциала (внизу) электропневматической форсунке газотурбинного авиационного двигателя

На рисунке 5.20 представлены поля напряженности электрического поля и объемной плотности заряда вблизи активного игольчатого электрода.

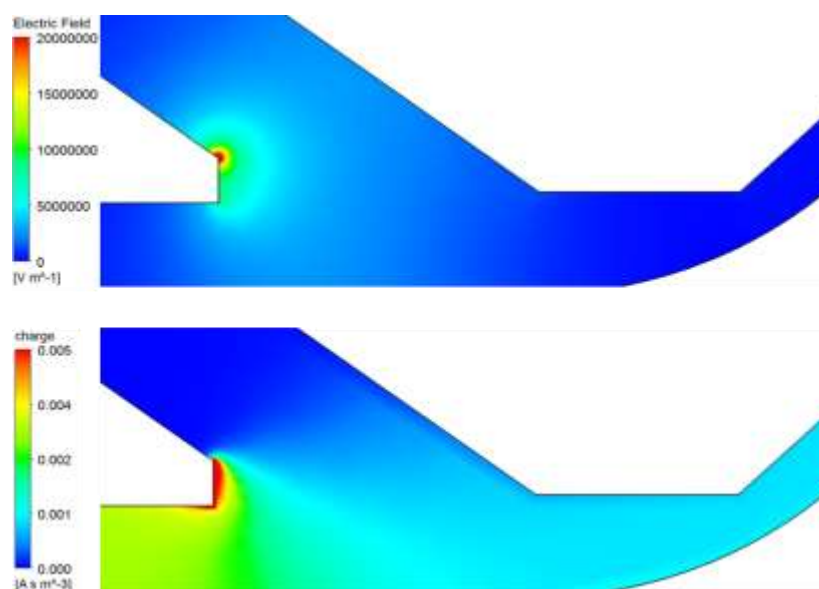


Рисунок 5.20 – Напряженность электрического поля (вверху) и объёмная плотность электрического заряда (внизу) внутри электропневматической форсунки газотурбинного авиационного двигателя вблизи электрода типа «игла»

В непосредственной близости от кромки пленки вольфрамового напыления образуется резко неоднородное электрическое поле, напряженность которого достигает величины $1,5 \cdot 10^8$ В/м. Это приводит к инжекции в топливо электрического заряда с конца игольчатого электрода.

В связи с высокой скоростью керосина в топливном канале, движение заряда в сторону второго электрода проявляется слабо. Попадание потока, двигающегося вдоль внутренней поверхности канала ЭПФ в застойную зону, описанную выше, приводит к сравнительно высокой концентрации заряда в ней. Вместе с тем, тот факт, что движение заряда в основном определяется течением потока керосина, способствует выносу большей доли инжектируемого заряда из электропневматической форсунки, так как лишь малая его часть достигает противоположного электрода.

В результате расчёта на выходе ЭПФ была получена объёмная плотность заряда $0,00107$ Кл/м³. Это ниже, чем объёмная плотность заряда на выходе из рассмотренного выше базового ЭУВТ в цепи питания топливной форсунки, но в

данном случае будет отсутствовать рассеяние заряда в трубопроводах подвода топлива от ЭУВТ к топливной форсунке и в самой форсунке.

При практическом использовании разработанных методов повышения эффективности распыла топлива и сгорания топливновоздушной смеси в газотурбинных авиационных двигателях в ряде случаев целесообразно для получения суммарного эффекта включение в цепь питания ЭПФ непосредственно на ее входе электрического устройства воздействия на топливо (ЭУВТ).

5.3 Математические модели и методы численного моделирования распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях

5.3.1 Теоретические модели описания течения двухфазного потока и распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях

Моделирование течения двухфазного потока осуществлялось с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Для расчётов полных моделей, в ходе которых определялись осреднённые во времени поля скорости на выходе из топливных и воздушных каналов форсунок, использовался VOF (Volume Of Fluid) метод. Полученные поля скорости использовались в качестве граничных условий при расчётах распыла топлива в усечённых моделях форсунок, в этом случае топливо представлялось в виде потока капель с заданным начальным диаметром, а вторичное дробление описывалось с помощью подхода Эйлера к описанию многофазных потоков с подключенным уравнением баланса популяций.

При расчёте многофазного потока VOF методом для всех компонент потока решается один набор уравнений сохранения импульса и отслеживается объемная доля топлива в каждой отдельной ячейке расчётной сетки α_q [314]. Если $\alpha_q=0$, то в ячейке отсутствует топливо, если $\alpha_q=1$, то вся ячейка заполнена топливом. При значениях α_q от 0 до 1 в ячейке присутствует интерфейс между различными жидкостями. В зависимости от значения α_q в ячейке определяются те или иные

свойства потока и переменные. Отслеживание интерфейса между фазами осуществляется на основании уравнения неразрывности для объемной доли фазы [314]. При наличии q фаз уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right], \quad (5.12)$$

где ρ_q – плотность топлива, \vec{U}_q – вектор скорости топлива, \dot{m}_{qp} – перенос массы от топлива к воздуху и \dot{m}_{pq} – перенос массы от воздуха к топливу. Уравнение массовой доли не решается для главного компонента смеси (в данном случае воздуха), его массовая доля определяется на основании того, что сумма массовых долей топлива и воздуха должна равняться единице. Для определения массовой доли в явной постановке используется следующее выражение:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V, \quad (5.13)$$

где $n+1$ – индекс текущего шага по времени, n – индекс предыдущего шага по времени, α_q^{n+1} – значение массовой доли топлива в ячейке на шаге по времени $n+1$, α_q^n – значение массовой доли топлива в ячейке во время шага по времени n , $\alpha_{q,f}^{n+1}$ – значение массовой доли топлива на грани элемента в момент времени $n+1$, U_f^{n+1} – объемный поток через грань элемента в момент времени $n+1$, V – объем ячейки.

Свойства потока, которые участвуют в уравнениях переноса, вычисляются в зависимости от наличия той или иной фазы в каждом контрольном объеме. Для двухфазной системы плотность определяется как:

$$\rho = \alpha_q \rho_q + (1 - \alpha_q) \rho_p, \quad (5.14)$$

где α_p и ρ_p – массовая доля и плотность воздуха соответственно. Остальные свойства, такие как вязкость и пр. определяются подобным образом.

Как было сказано выше, в VOF подходе одно поле скорости определяется для всех фаз, и уравнение импульса зависит от объемной доли всех фаз через плотность и вязкость.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{U} + \nabla U^T)], \quad (5.15)$$

где p – статическое давление.

Ограничением данного подхода является то, что при большой разнице скоростей фаз, движущихся рядом, снижается точность определения скорости вблизи интерфейса между ними.

Поток принимался изотермическим, поэтому уравнение энергии не решалось.

Для учета сил поверхностного натяжения топлива в уравнение импульса вводился дополнительный источниковый член [314]. Для двухфазного потока без сообщения электрического заряда топливу рассматриваемого он имеет вид:

$$F_{vol} = \sigma \frac{\rho k_q \nabla \alpha_q}{0,5(\rho_q - \rho_p)}, \quad (5.16)$$

где ρ – среднеобъемная плотность, определяемая согласно выражению (3.70), σ – коэффициент поверхностного натяжения, k_q – кривизна интерфейса между фазами.

Для замыкания данных уравнений при RANS расчётах использовалась SST (Shear Stress Transport) модель турбулентности. Данная модель [208] представляет собой линейную комбинацию $k-\omega$ модели Вилкокса [315] с весом $(1-F_1)$ и $k-\varepsilon$ модели турбулентности Лаундера и Сполдинга [316], записанной в терминах $k-\omega$, с весом F_1 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta' \rho k \omega, \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \\ + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 3} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2, \end{aligned} \quad (5.18)$$

где ω – удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, $\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$ – турбулентная вязкость, β' , α , β , σ_k и σ_ω – константы, а источниковый член P_k в правой части отвечает за возрастание кинетической энергии турбулентности за счёт действия вязких сил:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \left(3\mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \rho k \right). \quad (5.19)$$

Преимуществом k – ω модели является лучшее описание течения вблизи стенок. Также, учитывая чувствительность к частотам турбулентных пульсаций, k – ω обеспечивает лучший перенос турбулентных параметров по потоку, но по этой же причине она оказывается очень чувствительной к заданным граничным условиям [140]. В зависимости от заданного на входе значения ω можно получить существенно отличающиеся результаты решения. Именно эту проблему в SST модели решает комбинирование k – ω с менее чувствительной k – ε моделью с весом:

$$F_1 = \tanh \left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \right] \quad (5.20)$$

где y – расстояние до стенки. В такой формулировке F_1 равна нулю около поверхности канала и постепенно приближается к 1 вне пограничного слоя.

Необходимо отметить также, что гипотеза турбулентной вязкости, которую используют обе модели, и $k - \varepsilon$, и $k - \omega$, подразумевает изотропный характер турбулентности, что не соответствует течению в пограничном слое вблизи стенки. В этом слое и в застойных зонах использование обеих моделей существенно завышает μ_t из-за больших сдвиговых напряжений и, соответственно, значительной величины источникового члена в областях с незначительным переносом. Более точные результаты можно получить путём введения ограничителя на турбулентную вязкость:

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}, \quad (5.21)$$

где $F_2 = \tanh \left[\max^2 \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]$, а S – инвариантная мера скорости деформаций.

При моделировании процесса распыла топлива описывалось течение двухфазного потока, одна из фаз которого является сплошной средой, а вторая – дисперсной. Расчёты выполнялись в Эйлеровой постановке в программном комплексе ANSYS Fluent. В связи с большим количеством решаемых уравнений и неустойчивостью данного типа расчётов использовались упрощенные модели, граничные условия для которых были определены с использованием VOF расчётов. При моделировании многофазных течений в рамках подхода Эйлера решается система уравнений, состоящая из *законов сохранения массы*:

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{U}_i) = 0 \quad (5.22)$$

и *законов сохранения импульса*:

$$\frac{\partial \alpha_i \rho_i \bar{U}_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{U}_i \bar{U}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_i) + \sum_{p=1}^N \bar{R}_{ij}, \quad (5.23)$$

$$\bar{\tau}_i = \alpha_i \mu_i (\nabla \bar{U}_i + (\nabla \bar{U}_i)^T) \quad (5.24)$$

для каждой из фаз, которые нумеруются индексами i и j , α_i , ρ_i , U_i – соответственно объемная доля, плотность и скорость фазы.

Взаимодействие между разными фазами происходит благодаря члену $\sum_{i=1}^N \bar{R}_{ij}$ в законе сохранения импульса. Этот член задается в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N \bar{R}_{ij} = \sum_{i=1}^N K_{ij} (\bar{v}_i - v_j), K_{ij} = \frac{18\mu_i f}{d_p^2} \alpha_i (1 - \alpha_i), \quad (5.25)$$

где $f = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}, & \text{Re} < 1000 \\ 0.01833 \text{Re}, & \text{Re} > 1000 \end{cases}, \text{Re} = \frac{\rho_i |U_i - U_j| d_p}{\mu_i}.$

Параметром, определяющим взаимодействие фаз, является *средний заутеровский диаметр дисперсной фазы* d_p , который по умолчанию задается равным 10 мкм и для каждой конкретной задачи его необходимо подбирать. Для осуществления возможности рассчитывать распределение диаметров капель в потоке используется *уравнение баланса популяций*.

Подключение модуля с уравнениями баланса популяций предоставляет возможность вычислять средний заутеровский диаметр, а не задавать его изначально. Помимо увеличения эвристичности метода Эйлера, этот модуль позволяет получать оценку для среднего заутеровского диаметра, одной из важных характеристик распыла топлива в камерах сгорания.

В случае подключения этого модуля, помимо уравнений (5.22) - (3.80), также решается уравнение для функции распределения по диаметрам капель $f(d)$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (Uf) + \frac{\partial}{\partial d} [G_d f] = B_{ag} - D_{ag} + B_{br} - D_{br}, \quad (5.26)$$

где B_{ag} - слагаемое, отвечающее за рождение капель большего размера при объединение мелких капель; D_{ag} - слагаемое, отвечающее за исчезновение мелких капель в результате их объединения; B_{br} - слагаемое, отвечающее за появление мелких частиц в результате распада крупных; D_{br} - слагаемое, отвечающее за исчезновение крупных частиц в результате их распада; слагаемое $\frac{\partial}{\partial d} [G_d f]$ отражает возможность изменения диаметра капель за счет испарения или конденсации жидкости на их поверхности.

В связи с тем, что при моделировании распыла поток капель задавался внутри канала форсунки, где они не взаимодействовали с воздушным потоком, в данной работе объединение капель не учитывалось, поэтому слагаемое $\frac{\partial}{\partial d}[G_{df}]$ принималось равным 0, а также не определялась модель для расчета слагаемых B_{ag} и D_{ag} . В противном случае внутри топливного канала начинался интенсивный процесс объединения капель, приводивший к увеличению их диаметра до размеров, превышающих размеры форсунки.

Скорость распада крупных частиц определяется выражением:

$$g(V')\beta(V|V'), \quad (5.27)$$

где $g(V')$ - частота распада частиц объемом V' , $\beta(V|V')$ - функция плотности распределения вероятности (ФПРВ) распада частиц объемом V' в частицы объемом V .

Скорость появления новых капель при распаде:

$$B_{br} = \int_{\Omega_V} p g(V') \beta(V|V') n(V') dV', \quad (5.28)$$

где n – функция распределения размера частиц, p – количество дочерних частиц при распаде.

Скорость исчезновения крупных частиц из-за распада:

$$D_{br} = g(V)n(V), \quad (5.29)$$

Для определения частоты распада частиц и ФПРВ распада использовалась модель Луо, в которой скорость распада определяется с помощью интеграла по размеру вихрей, взаимодействующих с частицей диаметром d :

$$\Omega_{br}(V, V') = K \int_{\xi_{min}}^1 \frac{(1 + \xi)^2}{\xi^n} \exp(-b\xi^m) d\xi, \quad (5.30)$$

где $\xi = \lambda/d$ – безразмерный размер вихрей, значения коэффициентов: $n=11/3$, $m=11/3$, $K=0.9238\varepsilon^{1/3}d^{-2/3}\alpha$, $b=12[f^{2/3}+(1-f)2/3-1]\sigma\rho^{-1}\varepsilon^{-2/3}d^{-5/3}\beta^{-1}$, $\beta=2,047$.

Для решения уравнения (5.26) используется подход, основанный на замене функции её моментами – *QMOM* (Quadrature Method of Moments – квадратурный метод моментов):

$$M_k = \int_0^{\infty} D^n f(d) dD, \quad (5.31)$$

где M_k – k -й момент, D – диаметр капли.

Для вычисления заутеровского диаметра, равного отношению момента функции распределения 3-его порядка к моменту 2-ого порядка:

$$d_{32} = M_3 / M_2, \quad (5.32)$$

достаточно значений первых четырех моментов, хотя в ANSYS Fluent имеется возможность обсчитывать до 8 моментов.

Для замыкания системы уравнений (5.22) - (5.24) при их решении с использованием подхода осреднения по Рейнольдсу использовалась *SST модель турбулентности*.

При вычислении b , входящего в уравнение (5.), при исследовании электрогидродинамических процессов при распыливании топлива используется впервые полученное выражение (2.19) для коэффициента поверхностного натяжения капли (в данном случае σ), который, в свою очередь, зависит от заряда, сообщенного капле. Для данного случая выражение (2.19) переписывается в виде

:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - 0,67 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{5,48q}{\sqrt{8\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 d_K^3 \sigma_0}}} \right) \right], \quad (5.33)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения заряженной капли топлива, σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения незаряженной капли топлива, q – заряд капли топлива, d_K – диаметр капли.

Таким образом, теоретическая модель учитывает влияние заряда капли на её дробление турбулентным потоком.

В ANSYS Fluent для решения уравнений теоретической модели также используется метод контрольных объемов, но он несколько отличается от метода, применяемого в ANSYS CFX.

Для преобразования исходных дифференциальных уравнений в алгебраические они также интегрируются по каждому контрольному объёму, после чего объёмные интегралы заменяются поверхностными. Однако, контрольные объёмы не создаются вокруг узлов, а используются существующие элементы расчётной сетки. Значения всех величин определяются в центрах элементов, а для вычисления поверхностных интегралов используются значения в центрах граней элементов (рисунок 5.21). Согласно используемой схеме первого порядка точности значения на гранях принимаются равными значению в центре элемента, расположенного выше по потоку (исходя из текущего поля скорости).

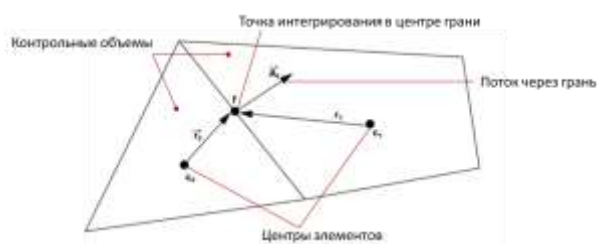


Рисунок 5.21 – Особенности использования контрольных объемов в ANSYS Fluent при исследовании электрогидродинамического распыливания топлива электрокаплеструйными форсуночными модулями

Решение уравнений в ANSYS Fluent осуществляется согласно схеме, представленной на рисунке 5.22.



Рисунок 5.22 – Схема выполнения расчёта в ANSYS Fluent

5.3.2 Повышение точности численного моделирования процесса распада жидкой пленки в воздушном потоке выбором модели турбулентности

Разработана методика расчета двухфазных потоков в форсуночных модулях на основе решения модельной задачи – верификации модели двухфазного течения на задаче распада жидкой колонны под действием набегающего потока воздуха. Определены модели турбулентности, удовлетворительно описывающие процессы двухфазного течения [5], которые могут быть применены для расчета процессов переноса электрического заряда потоком керосина (см. 4 главу) и распыла топлива в различных типах авиационных двигателей.

. Для заданного режима двухфазного течения определяется траектория отклонения жидкой струи при воздействии на нее потока воздуха. В качестве

модельной жидкости используется вода. При этом анализируется влияние модели турбулентности на точность результатов расчета в сравнении с имеющимися экспериментальными данными [5]. В [5] автором подробно описана методика расчета процесса распада жидкой пленки в воздушном потоке с позиций повышения точности расчетов в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

Модель представляет собой объем (параллелепипед), где имеется отверстие диаметром 1,3 мм для подачи воды. С торца объема подается набегающий поток воздуха.

Для отработки методики распыла жидкой колонны были проведены вычислительные эксперименты для различных вариантов сеточных моделей. К расчетной сетке применялась локальная адаптация с висящими узлами [5]. Применение данного алгоритма позволяет получать удовлетворительную точность определения границ жидкой пленки и размеров, образующихся при ее дроблении на капли. При этом влияние на результаты расчета оказывает и выбор типа начальной сеточной модели (регулярная гексаэдрическая сетка или нерегулярная изотропная тетраэдрическая сетка). Для данного случая имеются результаты [47, 168, 317] достаточного соответствия расчетных и экспериментальных данных.

Для проведения вычислительных экспериментов была выбрана «большая» регулярная гексаэдрическая сетка, позволяющая удовлетворительно разрешать границы раздела фаз и получать траекторию струи, наиболее приближенную к траектории по натурному эксперименту [5].

Задавали следующие граничные условия. Вода поступала в расчетную область со скоростью 10,83 м/с, плотность воды 1000 кг/м^3 , динамический коэффициент вязкости воды $10^{-3} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$. Набегающий поток воздуха поступал со скоростью 120,4 м/с, плотность воздуха 1.225 кг/м^3 , динамический коэффициент вязкости воздуха $1.82 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$. На выходе из расчетной области была задана открытая граница со статическим давлением, равным атмосферному. Стенка расчетной области непроницаемая, гладкая, нетеплопроводная. Коэффициент

поверхностного натяжения $\sigma = 0,07$ Н/м, соотношение чисел Вебера потоков жидкости и воздуха 6,6.

Выбор модели турбулентности с позиций увеличения точности расчетов на базе полученных результатов суперкомпьютерных вычислений [5]. Кроме выбора сеточной модели, дополнительным влиянием на точность определения профиля струи, как показали расчеты, обладает выбор модели турбулентности. Дополнительная турбулентная вязкость сглаживает неровности на поверхности пленки, а также пульсации самого потока, за счет чего пленка распадается на струи, далее на капли, которые сносятся потоком воздуха. Однако траектория и характер распада струи на капли (или вовсе отсутствие распада) отличаются для различных моделей турбулентности.

В ходе вычислительных экспериментов было необходимо обосновать выбор модели турбулентности. Были проведены вычислительные эксперименты для следующих вариантов: прямое моделирование без привлечения уравнений турбулентности (DNS), с учетом моделей турбулентности: $k - \omega$, LES, DES.

Модель $k - \omega$ использовалась как одна из наименее чувствительных к качеству сеточной модели (с учетом дробления предполагаются быстрые двукратные переходы размера ячеек по потоку).

Также проведено прямое моделирование без привлечения уравнений турбулентности (DNS), исходя из предположения о достаточности размерности дробимой сеточной модели вблизи поверхности раздела фаз.

Метод крупных вихрей (LES) занимает промежуточное положение между моделями, использующими осредненные уравнения Рейнольдса (RANS) и методом прямого моделирования DNS. Здесь крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются. Модель LES более требовательна к расчетной сетке и требует большие вычислительные ресурсы. В настоящее время с имеющимися возможностями многопроцессорных технологий параллельных вычислений метод LES оказывается доступным для решения важных масштабных инженерных задач.

Моделирование отсоединенных вихрей (DES) удачно сочетает сильные стороны модели SST (RANS) – надежность расчета безотрывных течений с возможностью расчета течений с обширными зонами отрыва, обеспечиваемой моделью LES. В результате появляется возможность с достаточно высокой степенью точности рассчитать сложные отрывные течения.

Для расчетов использовалась модель свободной поверхности VOF (Volume of fluid) в ANSYS Fluent [320]. Данный метод предусматривает существование четкой границы раздела фаз. Здесь объемная доля жидкости α в различных точках пространства является величиной дискретной: 0 – воздух, 1 – жидкость. Объем жидкости в ячейке определяется формулой $V_\alpha = \alpha V$, где V – объем ячейки.

Выбор модели свободной поверхности обусловлен наличием удовлетворительных результатов моделирования траектории жидкой пленки с использованием данной модели.

Для представления результатов численного моделирования процесса распада жидкой струи под действием набегающего потока воздуха использована изоповерхность объемной доли жидкости. На рис. 5.23,а-г представлен процесс формирования топливной пленки и её распад на отдельные капли для моделей турбулентности $k-\omega$, DNS, LES и DES соответственно. Рис. 5.24,а-г дает представление о распределении капель по сечению канала, а на рис. 5.25, а-г показан процесс дробления пленки и капель при движении вниз по потоку.

Для модели турбулентности $k - \omega$ можно отметить, что дополнительная турбулентная вязкость сглаживает неровности на поверхности струи и пленки, за счет чего пленка распадается на струи. Пленка образует форму купола, обладает большим сопротивлением и сносится потоком. Дальнейшего вторичного дробления струи не наблюдается. Для всех остальных вариантов моделей турбулентности (LES, DES) такого купола не наблюдается. С учетом моделей турбулентности LES, DES пленка распадается на струи и наблюдается дальнейшее дробление струи на капли. Данные модели турбулентности наиболее полно удовлетворяют результатам натуральных экспериментов [5].

Картина дробления на капли для моделей LES, DES, DNS сравнима и

симметрична. Можно наблюдать отличия только в конечных частях следа распространения капель. Картина распространения начальной части пленки жидкости одинакова для моделей LES и DES, но отличается для модели DNS. У моделей LES и DES наблюдается рябь на поверхности пленки, что характерно и для натурального эксперимента. Для модели DNS верхняя поверхность пленки гладкая.

Далее проводилось сравнение двух моделей турбулентности LES и DES, как наиболее удовлетворительно описывающих процесс дробления струи жидкости по сравнению с экспериментом. Обнаружено качественное совпадение картин распределения концентраций для этих моделей.

Для количественной оценки результатов нестационарного расчета по обеим моделям были выбраны семь сечений, перпендикулярных оси x . Первое сечение проходит через ось струи в месте ее входа в расчетную область. На рис. 5.26 представлено расположение семи сечений для визуализации результатов.

Для дополнения качественного анализа количественными оценками были рассчитаны графические зависимости изменения осредненной по площади объемной концентрации жидкости. Эти зависимости в различные моменты времени представлены на рис. 5.27,а-г. При этом использована осреднённая по площади объемная доля жидкости $\alpha_{ср}$, рассчитываемая как частное от деления объемной концентрации жидкости в сечении к площади сечения.

При анализе возникла сложность: общее время счета достигало четырех суток, а шаг по времени в нестационарном расчете ANSYS выбирался автоматически и менялся во время счета. В связи с этим были выбраны неодинаковые, но максимально близкие для моделей LES и DES моменты времени, отличающиеся в 5–7 знаков после запятой. На графиках (см. рис. 5.27) показаны отсчеты времени при использовании модели DES. Максимальная относительная погрешность при сравнении двух графиков не превышает 20 %. В большинстве рассмотренных точек погрешность не превышает 7 %, причем большие значения концентраций дает модель DES. Вместе с тем продолжительность расчета при использовании модели LES снижается примерно

на 15 %. Это позволяет говорить о возможности использовать, в некоторых случаях, более простую модель LES в расчетах. Таким образом, при выборе модели турбулентности для получения удовлетворительных результатов лучше использовать модель LES, которая, несмотря на большие вычислительные ресурсы, позволяет получать наиболее приемлемые результаты.

Таким образом, проведена отработка процесса численного моделирования задачи распада струи в ANSYS Fluent. Показано, что реализация VOF-модели с использованием адаптивного подсеточного моделирования позволяет выполнять расчеты распада жидкости на капли с высокой точностью.

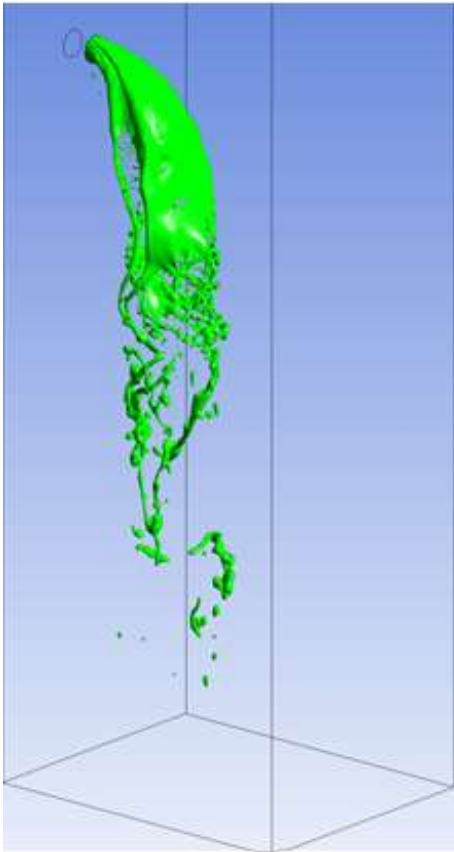
На результат моделирования влияет выбор модели турбулентности. Наилучшие результаты получены для реализации моделей LES и DES. При выборе данных моделей полученные результаты более достоверно моделируют траекторию отклонения жидкой струи при воздействии на нее потока воздуха. Достигнуто хорошее согласование с экспериментальными данными.

Разработанный подход к моделированию процесса распада жидкой колонны позволяет применять его при решении прикладных задач по оптимизации форсуночных модулей, определении граничных условий по распределению топлива при постановке задач, учитывающих горение.

5.3.3 Численное моделирование процесса распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях

В данном разделе представлены результаты расчётов распыла топлива в форсуночном модуле при включении ЭУВТ в цепь питания пневматической форсунки (ФМ-1) и в электропневматической форсунке (ЭПФ). В первом случае в форсуночном модуле топливо подвергалось воздействию электрического поля в ЭУВТ, установленном в магистраль подвода топлива, а во втором – непосредственно в форсунке. Для обоих случаев выполнены расчёты распыла топлива (керосина) с подачей электрического напряжения на электроды форсуночного модуля и без подачи электрического напряжения на электроды

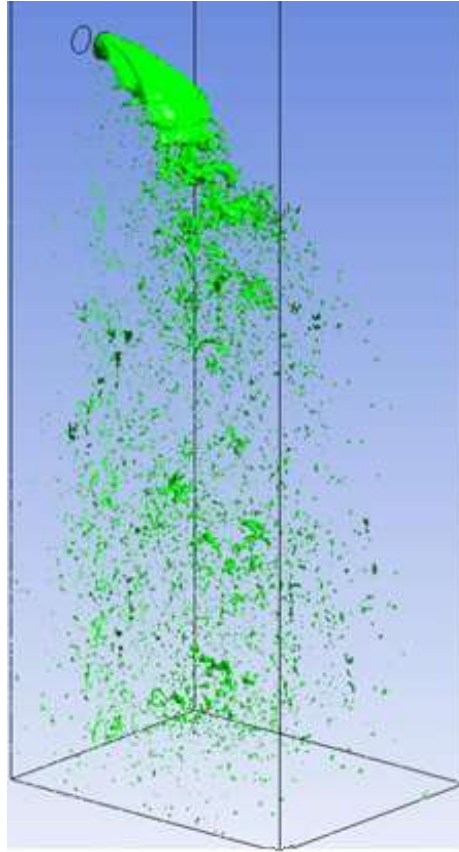
$k-\omega$



а

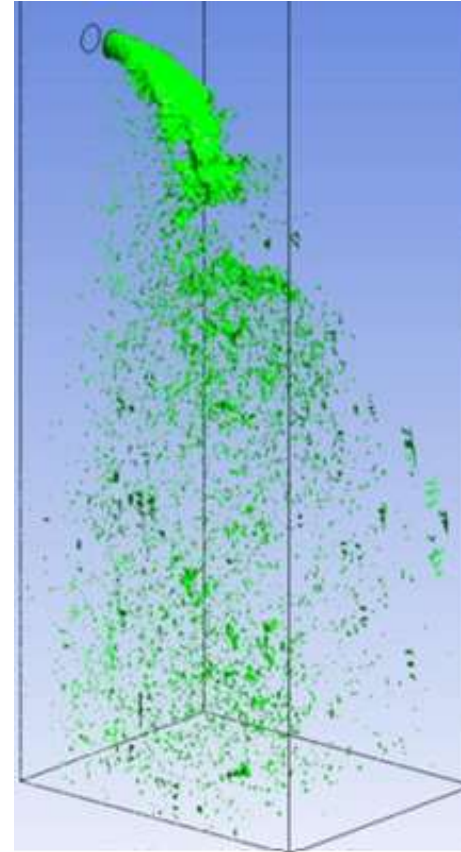
б

DNS



в

LES



г

DES

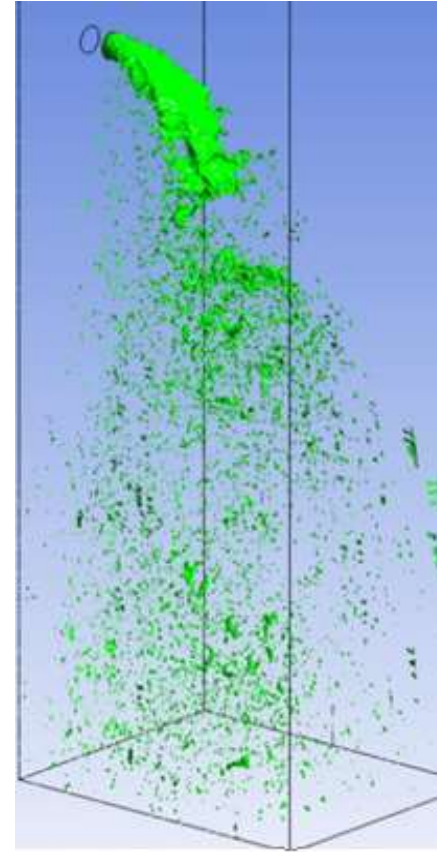
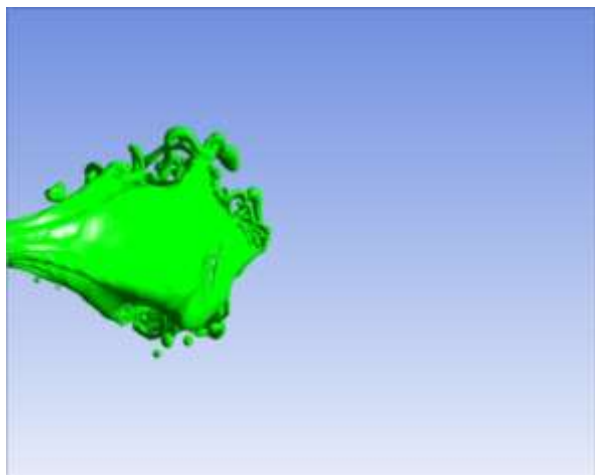


Рисунок 5.23 – Процесс формирования топливной пленки и её распад на отдельные капли для моделей турбулентности $k-\omega$, DNS, LES и DES

$k-\omega$



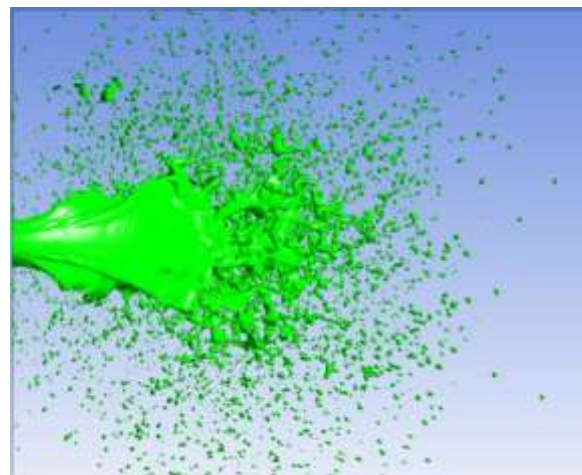
A

LES



B

DNS



б

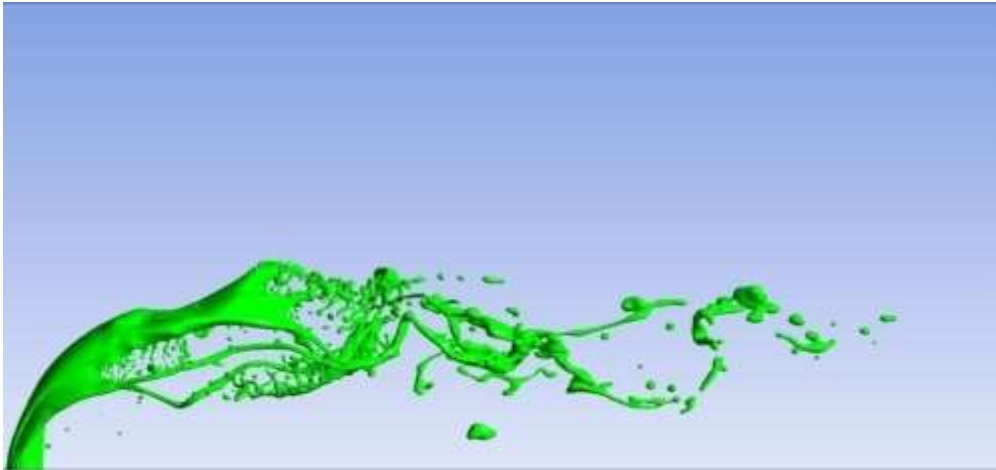
DES



з

Рисунок 5.24 – Распределения капель жидкости по сечению канала при различных моделях турбулентности

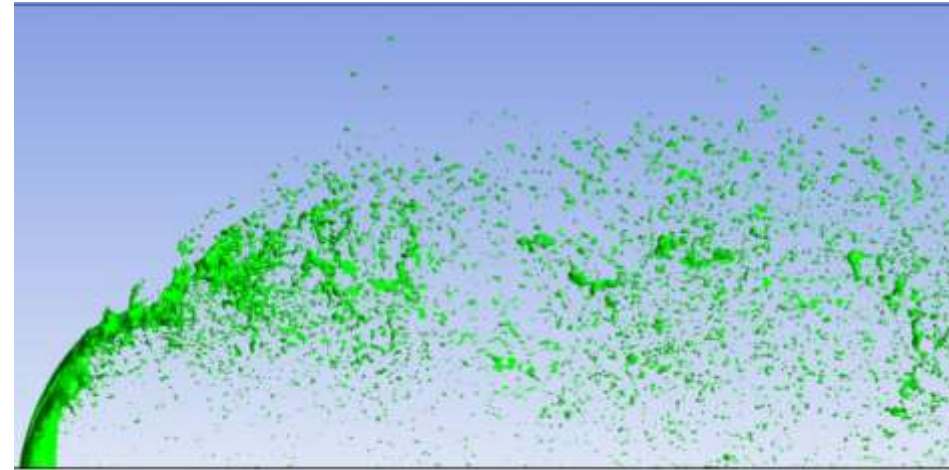
$k-\omega$



LES

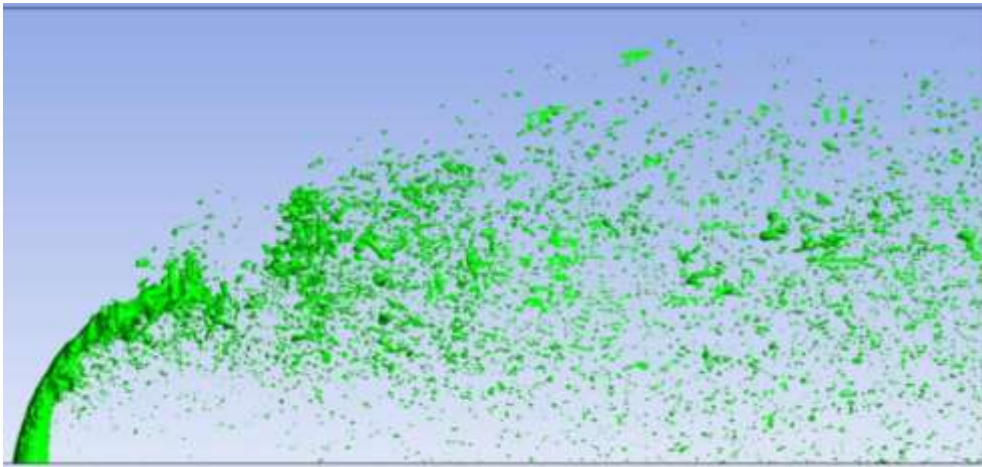
a

DNS

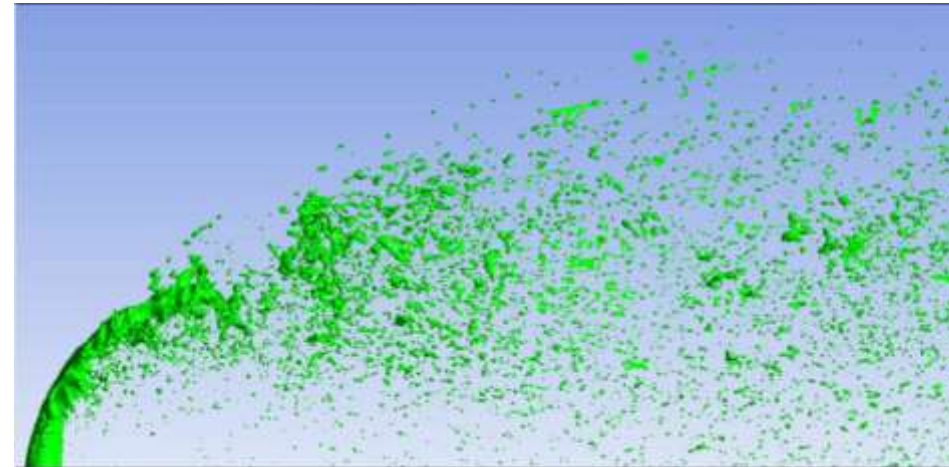


DES

б



в



г

Рисунок 5.25 – Процесс дробления пленки и капель жидкости при движении вниз по потоку при различных моделях турбулентности

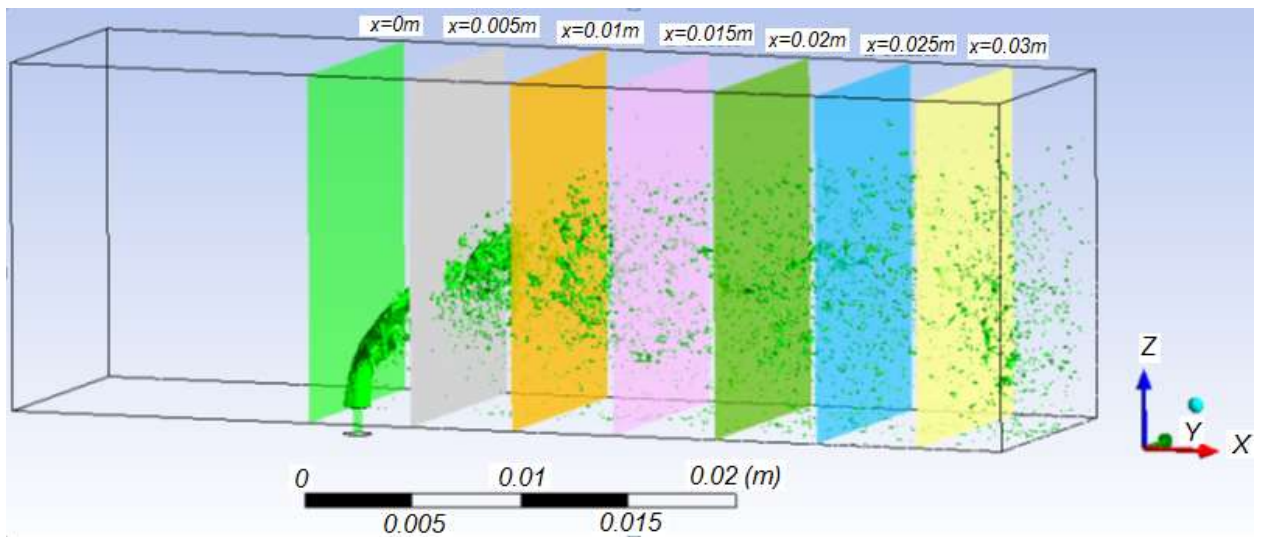


Рисунок 5.26 – Расположение сечений распыленной струи жидкости для сравнения результатов численных расчетов по моделям турбулентности LES и DES

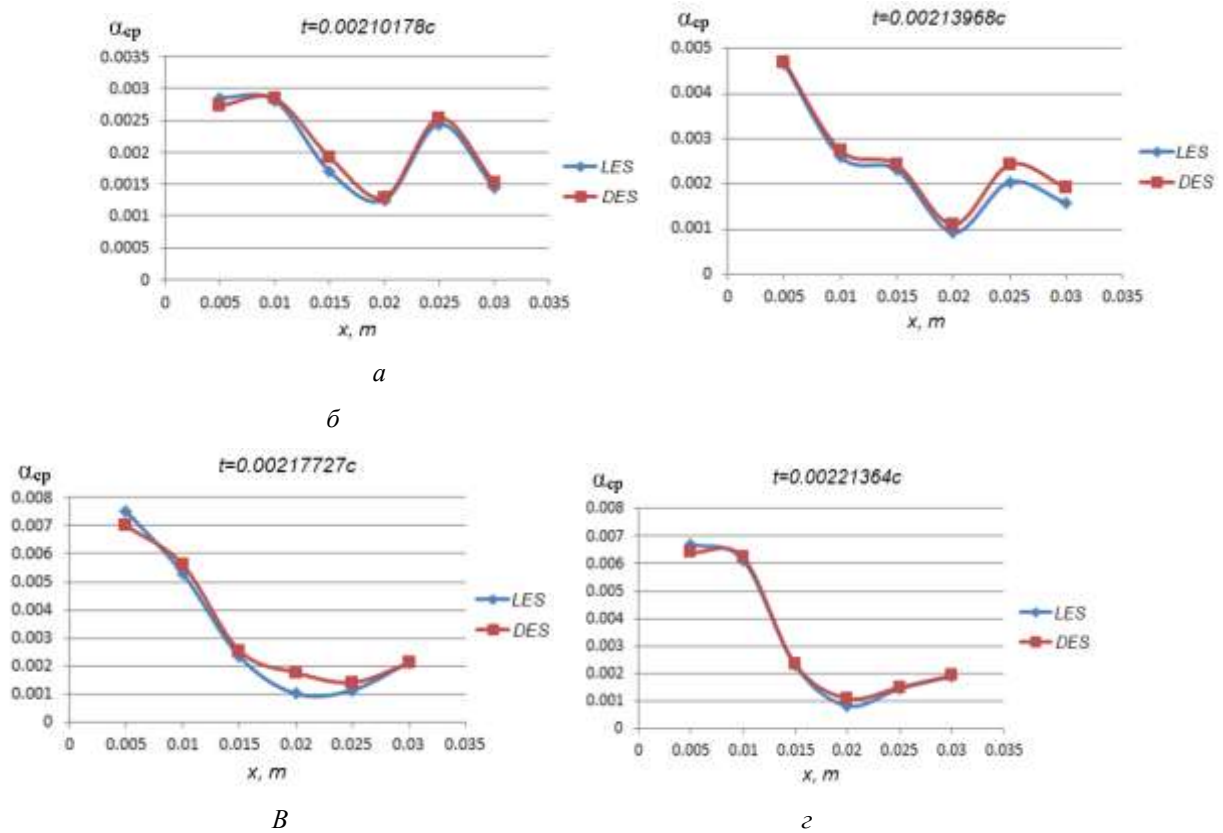


Рисунок 5.27 – Осредненная по площади объемная концентрация жидкости при численных расчетах при разных моделях турбулентности

форсуночного модуля. Это необходимо для сравнительной оценки влияния электрического поля на процесс распыла топлива.

В связи с большим количеством уравнений, решаемых в Эйлеровой постановке моделирования многофазных течений с подключенным уравнением баланса популяций, а также численной неустойчивостью подобного рода расчётов, процесс распыла моделировался с использованием усечённых моделей, в которых отсутствовали завихрители и каналы подвода топлива. Граничные условия для данных расчётов определялись с помощью расчётов течения двухфазного потока в полной модели методом VOF.

Форсуночный модуль ФМ-1 с большерасходным завихрителем испытывался в составе отсека по определению характеристик распыла в Самарском государственном Аэрокосмическом университете (СГАУ), для проведения расчётов была воссоздана геометрия данной установки. Модель ЭПФ для проведения расчётов была размещена в установке АО «ОДК - Авиадвигатель». При этом был взят малорасходный завихритель. В обоих случаях на выходе из сопла форсунки была создана сферическая область, в которую осуществлялось истечение потока. Геометрические модели расчётных областей представлены на рисунке 5.28.



Рисунок 5.28 – Модели ФМ-1 (слева) и ЭПФ (справа) в установках по определению характеристик распыла топлива

Сеточные модели расчётных областей были построены в программном комплексе ANSYS ICEM CFD. Тип сеток – неструктурированные, тетраэдральные с семью слоями призматических элементов. Для более точного описания процесса истечения топливной пленки из каналов форсунок в области распылителя использовались элементы размером 0,15 мм. Пространство внутри сопла завихрителя также было засечено элементами небольшого размера, а в области истечения элементы постепенно увеличивались от 0,5 мм вблизи форсунки до 4 мм на периферии.

Изображения расчётных сеток полных моделей представлены на рисунке 5.29. В расчётных сетках были созданы интерфейсы (на рисунке 5.29 представлены в виде границы между элементами различного цвета) для отслеживания параметров потока, которые затем переносились в качестве граничных условий на упрощенные модели. Положение интерфейсов было выбрано таким образом, чтобы, во-первых, отсесть сложные элементы геометрии, такие как лопатки завихрителей, а во-вторых, избежать обратного тока на них, так как отрицательная скорость, заданная в виде граничного условия входа, приводит к ошибкам в расчёте. В модели ФМ - 1 было 3 интерфейса: в центральном канале, в наружном и в топливном. В модели ЭПФ к ним добавился интерфейс в кольцевой поверхности, расположенной вокруг сопла завихрителя.

Упрощенные модели были созданы непосредственно в ICEM CFD путем удаления всех поверхностей, расположенных выше по потоку от интерфейсов. При построении сеток использовалась более густая сетка, включающая в себя элементы размером 0,12 мм в области распылителя, где начинается взаимодействие топливной пленки с потоком воздуха. Внутри сопла завихрителя использовались элементы размером 0,2 мм, а после выхода из него в предполагаемом конусе распыла - 0,5 мм. Сгущение было сделано до сечения, расположенного на 30 мм ниже от среза форсунки, в котором осуществлялись измерения в эксперименте.

Полученные расчётные сетки усечённых моделей представлены на рисунке 5.30. Параметры всех сеток – в таблице 5.3. Поскольку решатель Fluent использует для дискретизации элементы сетки, а не узлы, информация о количестве узлов не приводится.

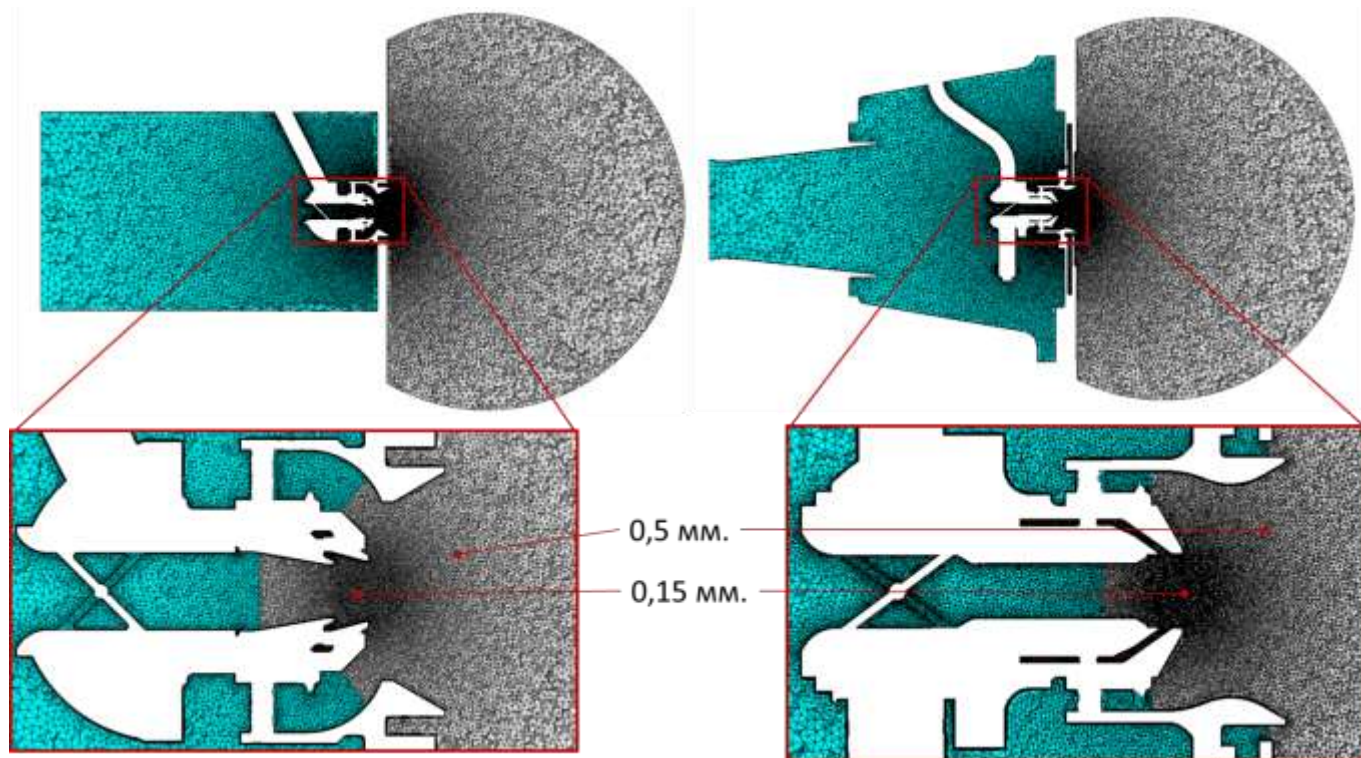


Рисунок 5.29 – Расчётные сетки полных моделей при численном моделировании электрокаплеструйных форсуночных модулей

Расчёты истечения топлива из форсунки в полных моделях были выполнены в ANSYS Fluent методом VOF. В качестве газовой среды использовался воздух при температуре с плотностью $1,225 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. В качестве топлива – керосин с плотностью 780 кг/м^3 , коэффициентом динамической вязкости $\mu = 0,0024 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Уравнение энергии не решалось, поток предполагался изотермическим. В расчёте учитывалась сила поверхностного натяжения топлива, равная $0,0264 \text{ Н/м}$.

В обоих случаях на входе в отсек задавалось избыточное полное давление воздуха 3000 Па , на сферической поверхности в области истечения – открытая граница со статическим давлением 1 атм. , через которую поток мог, как покидать расчётную область, так и затекать в неё. На входе в топливные каналы задавался

расход топлива, для ЭОФ он был равен зафиксированному в эксперименте (0,00679 кг/с), а для ЭПФ (ЭОФМ) – 0,0167 кг/с, что является средним расходом при испытаниях форсунок.

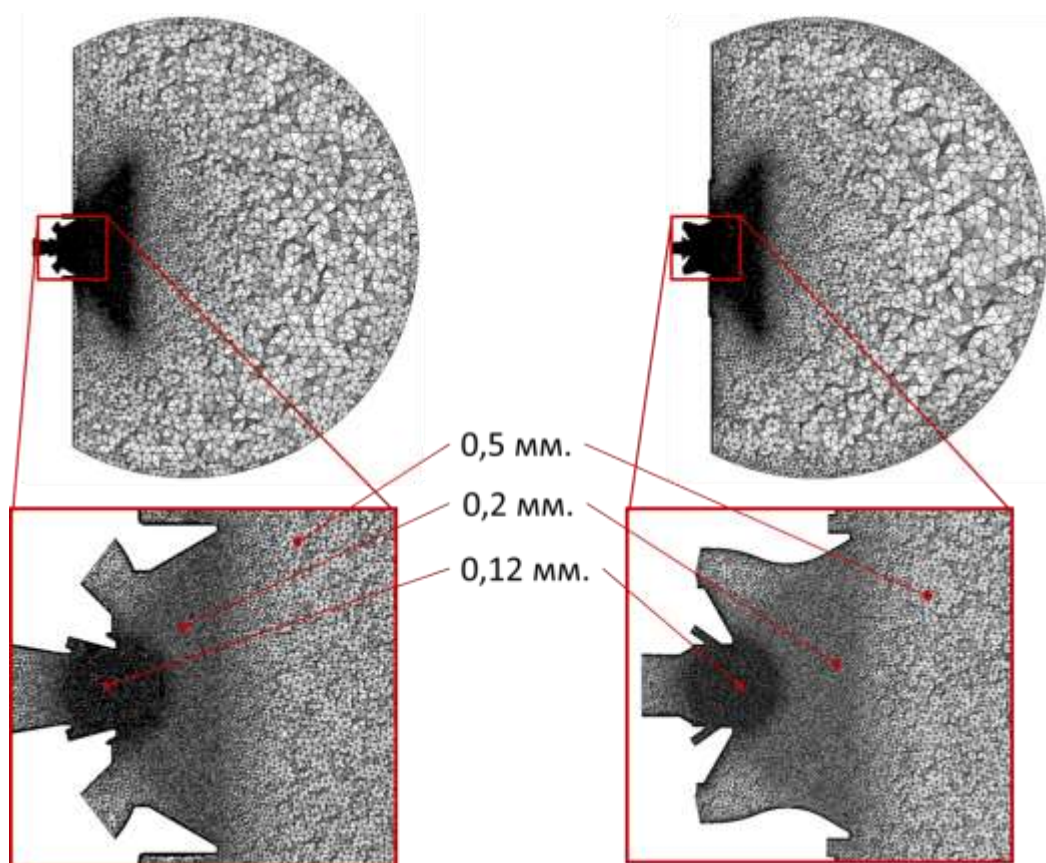


Рисунок 5.30 – Расчётные сетки упрощенных моделей при численном моделировании электрокаплеструйных форсуночных модулей

Таблица 5.3 – Параметры расчётных сеток

Модель	Количество тетраэдров, шт.	Количество призм, шт.	Минимальное качество элемента
ФМ -1 с ЭУВТ (полная)	12 234 667	2 740 955	0,045
ЭПФ (полная)	13 996 534	4 222 799	0,05
ФМ – 1 с ЭУВТ (упрощенная)	9 456 952	514 458	0,05
ЭПФ (упрощенная)	11 061 321	1 561 035	0,06

Расчёты выполнялись в нестационарной постановке с шагом по времени $1 \cdot 10^{-5}$ с, первые 5000 итераций были необходимы для развития нестационарного течения в расчётной области, в течение последующих 5000 итераций осуществлялось накопление статистики для получения осреднённых во времени профилей скорости и параметров турбулентности на интерфейсах.

На рисунке 5.31 представлены поля скорости, на которых видно, что ниже по потоку от форсунки происходит распад вихря с образованием зоны обратных токов (ЗОТ). В ФМ-1 максимальные скорости наблюдаются в наиболее узком месте сопла завихрителя, а в ЭПФ из-за более раскрытого сопла и зажатого завихрителя – в межлопаточных каналах.

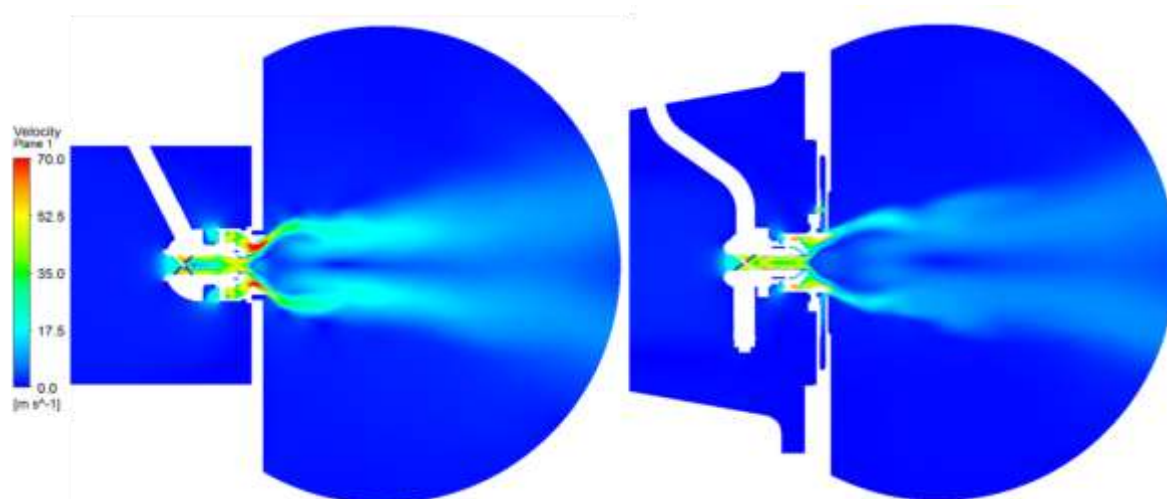


Рисунок 5.31 – Поля скорости при расчёте ФМ-1 с ЭУВТ (слева) и электропневматической форсунки (справа)

Потоки воздуха, вытекающие из центрального и периферийного завихрителей с двух сторон обтекали топливную пленку. Скорость топлива вблизи форсунки и его массовая доля в расчёте ФМ-1 показаны на рисунке 5.32, а в расчёте ЭПФ – на рисунке 5.33. Поскольку при расчётах методом VOF

определяется общее поле скорости, она представлена только для областей с массовой долей топлива больше 0,5%.

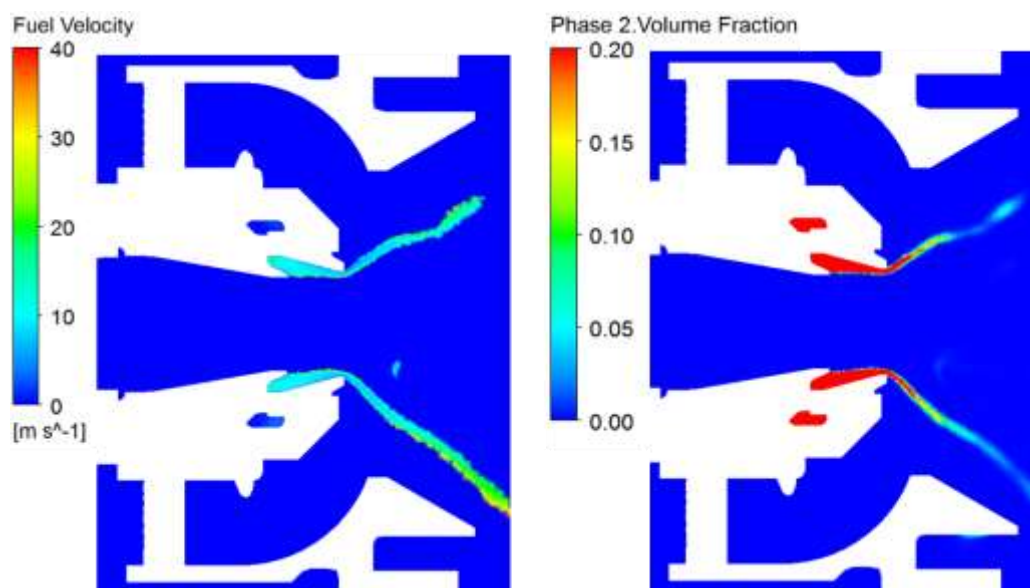


Рисунок 5.32 – Продольные поля скорости (слева) и массовой доли топлива (справа) в расчёте ФМ-1 (с ЭУВТ)

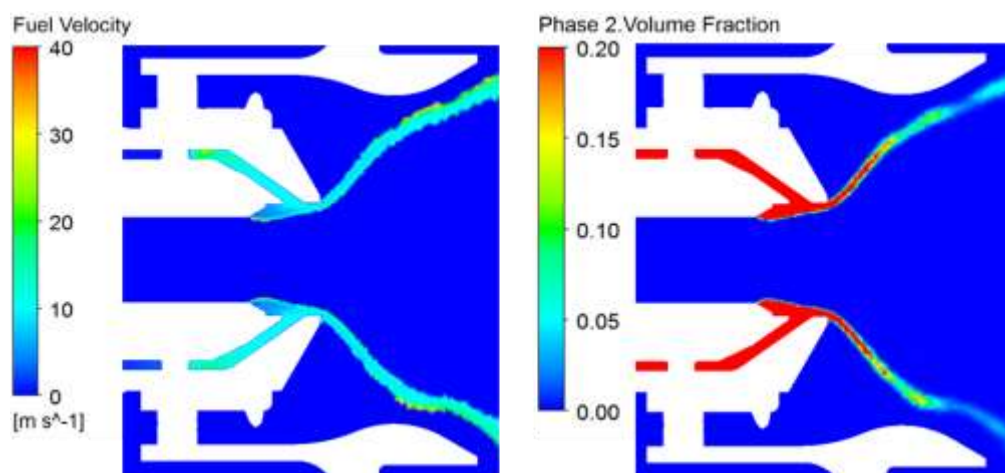


Рисунок 5.33 – Продольные поля скорости (слева) и массовой доли топлива (справа) в расчёте электропневматической форсунки

Из представленных данных видно, что после истечения из форсуночного модуля топливо начинает двигаться в виде конуса, постепенно увеличивая свою

скорость за счёт взаимодействия с воздушным потоком. В результате данных расчётов были определены поля скорости и параметров турбулентности на созданных интерфейсах (показаны поверхностями красного цвета на рисунке 5.34), а также установлены границы струи топлива, вытекающего из электропневматической форсунки, которые были использованы для построения расчётной области в задаче моделирования воздействия электрического поля на топливо.

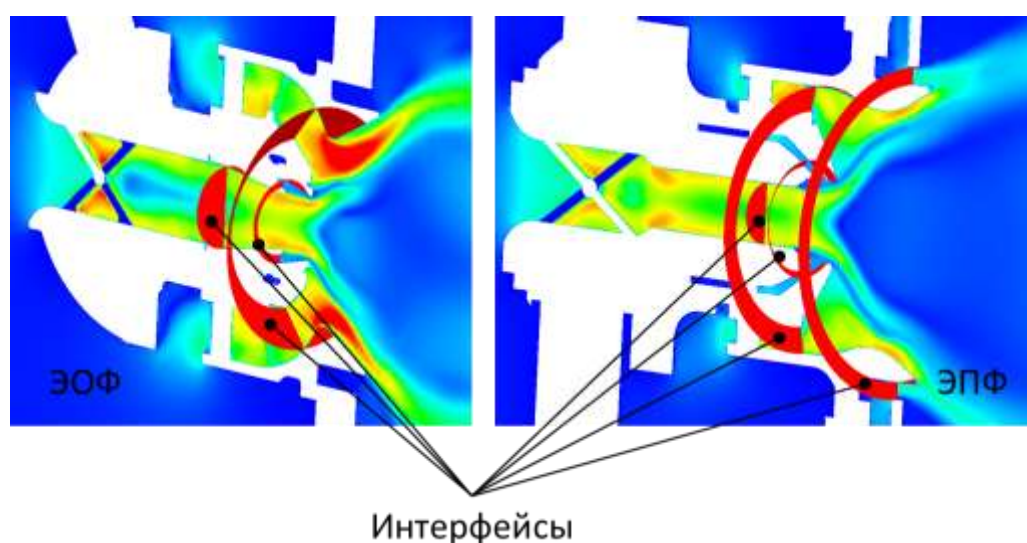


Рисунок 5.34 – Поверхности, используемые для определения граничных условий в форсуночных модулях

Расчёты распыла топлива в усечённых моделях были выполнены в ANSYS Fluent с Эйлеровой моделью двухфазного потока и подключенным уравнением баланса популяций, для решения которого использовался метод квадратурных моментов. Параметры воздуха и керосина принимались такими же, как в VOF расчёте полных моделей. Граничные условия входа были заданы на поверхностях, являвшихся интерфейсами в расчёте полной модели. Для них были импортированы поля скорости, кинетической энергии турбулентности и удельной скорости её диссипации. На сферической поверхности в области истечения была определена открытая граница со статическим давлением 1 атм. Для определения

распределения капель по размерам необходимо задать начальное значение их диаметра. Ранее было установлено, что оптимальным размером при моделировании вторичного дробления является величина 200 микрон. Исходя из указанного значения были определены моменты функции распределения капель по размерам по формулам:

$$M_0 = \frac{N}{V}, \quad M_1 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i, \quad M_2 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i^2, \quad M_3 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i^3,$$

где N – количество капель в области V , D_i – диаметр капли.

Исходя из определения моментов, средний диаметр капель в точке может быть определен в виде отношения M_1/M_0 .

В параметрах модели распада капель Луо был задан коэффициент поверхностного натяжения керосина. Для расчётов распыла без воздействия электрического поля он задавался 0,0264 Н/м, а для расчётов с воздействием электрическим полем с сообщением электрического заряда каплям топлива определялся согласно выражению (5.33). Использовалась объемная плотность электрического заряда, определённая при вышеприведенных электрогидродинамических расчётах ЭУВТ и ЭПФ), при этом предполагалось, что при движении топлива по трубопроводу от ЭУВТ к пневматической форсунке рассеяния заряда не происходит. Полученные значения коэффициентов поверхностного натяжения: **0,025 Н/м для системы ЭУВТ + ЭОФ и 0,0258 Н/м для электропневматической форсунки**, что ниже исходного значения на 5,3 и 2,3 % соответственно.

Результаты расчёта ЭФ-1 с пневматической форсункой с воздействием электрического поля в ЭУВТ на топливо и без него сравнивались между собой и с результатами определения характеристик потока капель на стенде СГАУ. Результаты расчётов электропневматической форсунки с воздействием электричества на топливо и без него сравнивались только между собой.

На рисунке 5.35 представлены поля скорости воздуха в продольном сечении пневматической форсунки с нанесёнными границами распространения топлива.

Вертикальной черной линией обозначена плоскость, в которой определялись характеристики потока капель в эксперименте, она расположена в 30 мм ниже по течению от среза распылителя форсунки.

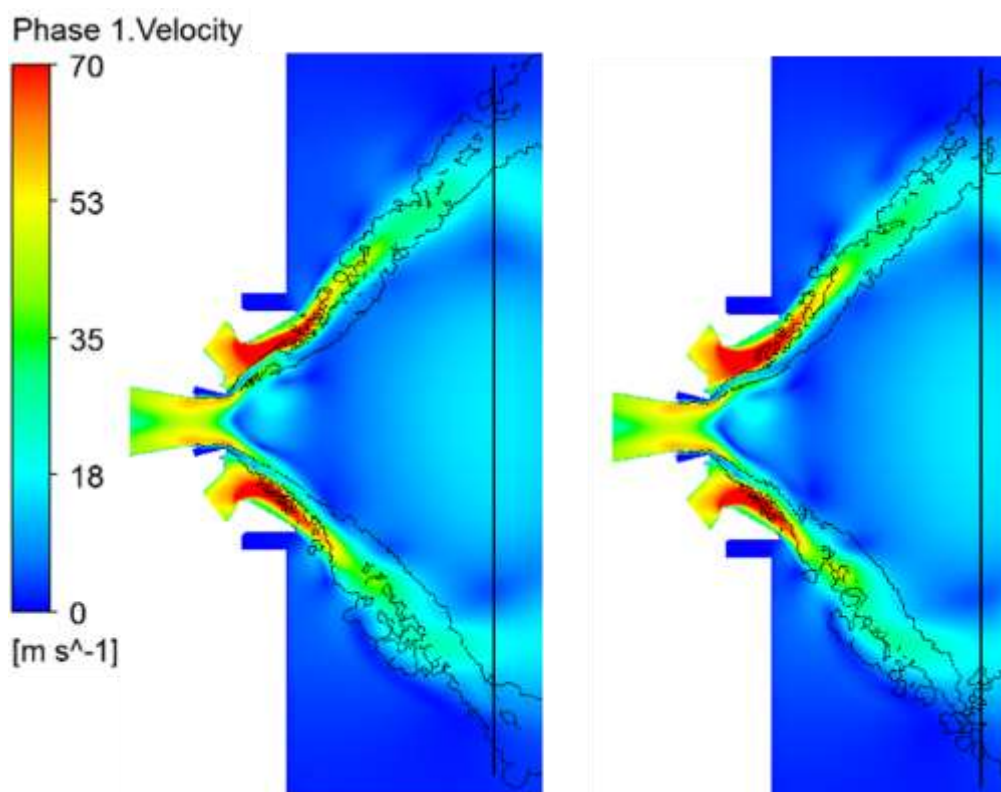


Рисунок 5.35 – Поля скорости воздуха и границы распространения топлива при расчёте распыла незаряженного (слева) и заряженного топлива (справа) в ФМ-1 с ЭУВТ

Согласно результатам расчёта, капли топлива распространяются в виде конуса, что не позволяет определить параметры распыла вблизи оси форсунки. Однако если рассмотреть результаты эксперимента с точки зрения количества капель, регистрируемых измерительной системой в секунду, то можно увидеть, что большая часть капель также распространяется в виде конуса.

На рисунке 5.36 представлено такое распределение в плоскости измерения вдоль координаты x . Количество капель, которое регистрировалось на радиусе 20...40 мм, на два порядка превышает аналогичный показатель в центре сечения и на три порядка – на периферии (радиус больше 45 мм). Таким образом,

попадание капель в центр и на периферию сечения носит, скорее всего, случайный характер и не разрешается при численном моделировании. Исходя из этого, диаметры капель будут сравниваться для радиуса 15 - 45 мм.

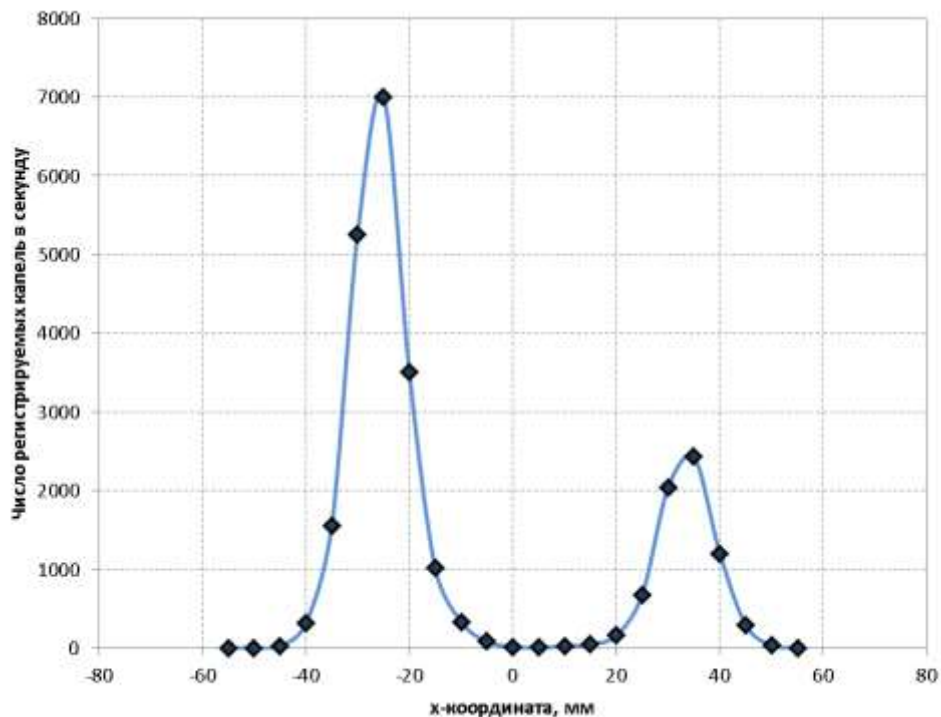


Рисунок 5.36 – Распределение количества регистрируемых капель по сечению в плоскости измерения

Распределение диаметров капель в плоскости измерения по радиусу, представлено на рисунке 5.37.

В целом, распределения, полученные при численном моделировании, качественно совпадают с результатами эксперимента. Диаметр капель уменьшается от периферии к центру сечения и при расчёте с ЭУВТ диаметр капель ниже, чем без него. Но при этом абсолютные значения диаметров, полученные в ходе расчётов, ниже измеренных в эксперименте, и чем ближе к оси форсунки, тем эта разница выше. Кроме того, на минимальном радиусе, где наблюдаются капли, их размер с воздействием ЭУВТ в три раза ниже, чем без него, что свидетельствует о чрезмерном влиянии коэффициента поверхностного натяжения на результаты расчёта.

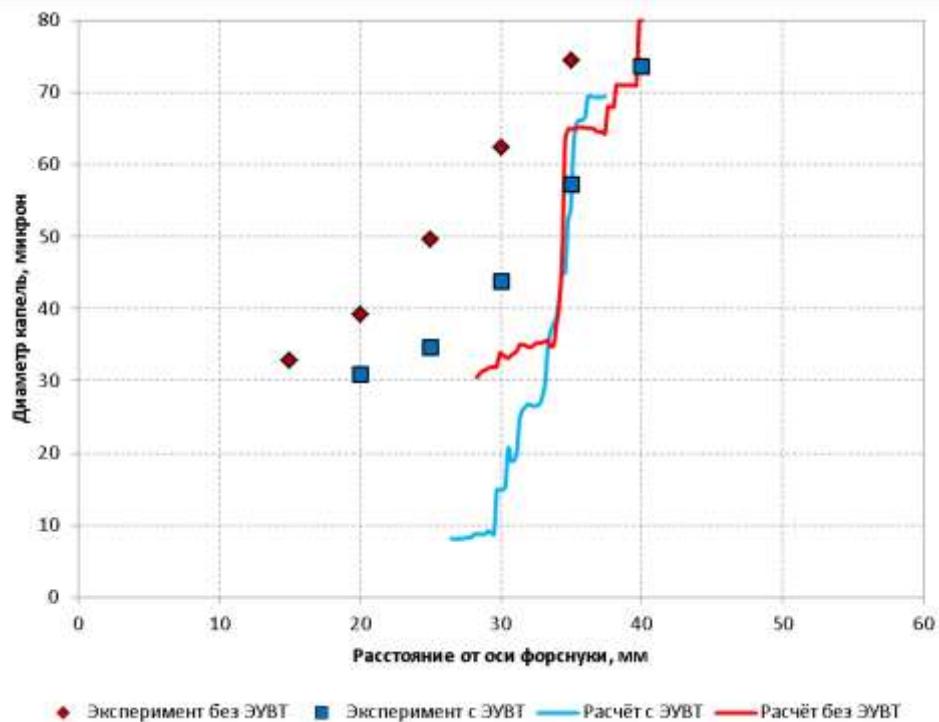


Рисунок 5.37 – Распределение диаметров капель по радиусу сечения в эксперименте и расчётах ЭОФ с ЭУВТ

Результаты численных расчётов распыла топлива в электропневматической форсунке. На рисунке 5.38 представлены поля скорости воздуха в продольном сечении электропневматической форсунки с нанесёнными границами распространения топлива. Вертикальной черной линией обозначена плоскость, в которой определялись диаметры капель, она расположена в 20 мм ниже по течению от среза распылителя форсунки. В данном случае топливо также распространяется в виде конуса, но некоторая его часть присутствует вблизи оси форсунки. Это топливо, с диаметрами капель, близкими к нулю, которое циркулирует в зоне обратных токов за форсункой, поэтому оно не учитывалось при определении распределения капель по радиусу сечения. Само распределение представлено на рисунке 5.39. Из него видно, что диаметр капель уменьшается от периферии к центру сечения и воздействие электрического поля на топливо приводит к снижению диаметра капель. В данном случае снижение составляет 12 - 15 %.

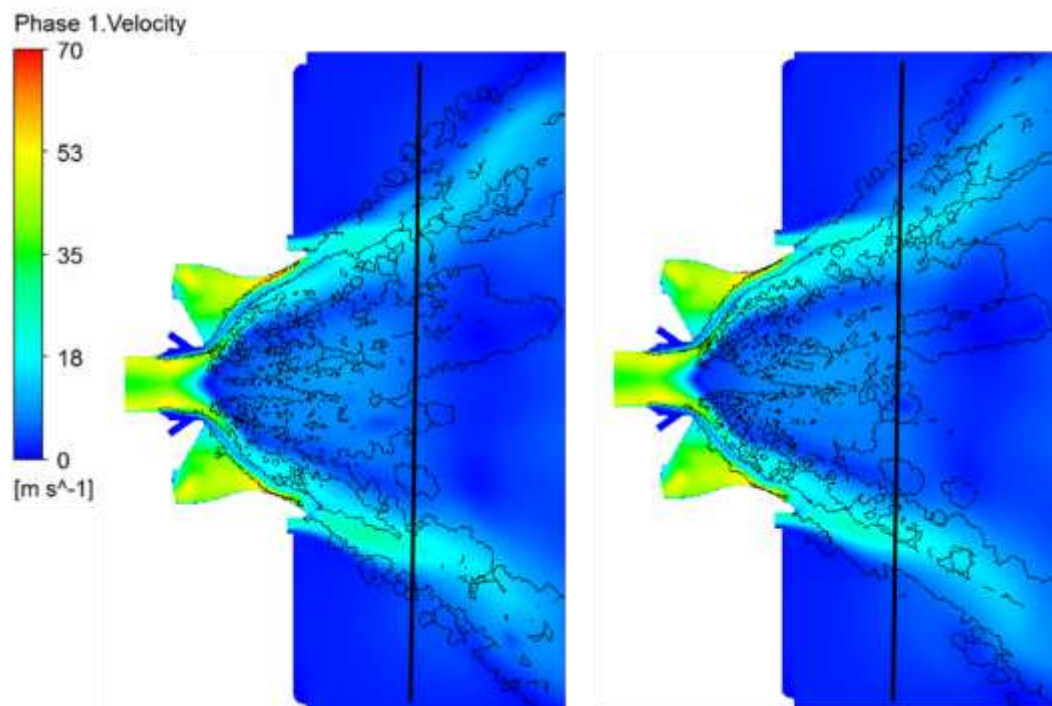


Рисунок 5.38 – Поля воздуха и границы распространения топлива при расчёте распыла незаряженного (слева) и заряженного топлива (справа) в электропневматической форсунке

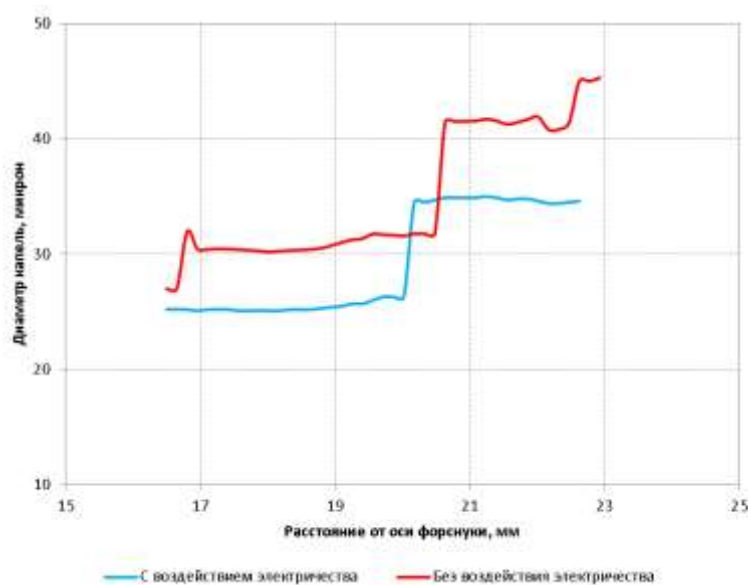


Рисунок 5.39 – Распределение диаметров капель по радиусу сечения в электропневматической форсунке без воздействия и с воздействием электрического поля

Несмотря на количественные отличия результатов расчёта ЭПФ от эксперимента, численное моделирование процесса распыла топлива продемонстрировало, что снижения коэффициента поверхностного натяжения каплей при сообщении им униполярного электрического заряда приводит к снижению диаметров каплей топлива по всему конусу распыла. Таким образом, электрическое воздействие на топливо может оказывать влияние на характеристики камеры сгорания авиационного двигателя за счёт изменения процессов, зависящих от характеристик распыла форсунки.

5.3.4 Верификация экспериментом основных положений теоретических моделей при численном моделировании процессов распыла топлива в электрокаплеструйных форсуночных модулях

Приведены результаты экспериментальных исследований [6,24,41] влияния электрического поля при включении ЭУВТ в цепь подачи топлива к форсунке на распыл керосина ТС-1, полученные на испытательном стенде УПФ-372 [318] Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ).

На установке УПФ-372 локальные и средние диаметры и скорости каплей керосина в выбранных точках факела измеряются с помощью трёхкомпонентного лазерно-оптического фазо-доплеровского анемометра 3D-LDA-PDA (фирмы Dantec Dynamics, Дания). В состав 3D-LDA-PDA входят, в частности, лазерная установка фирмы *Spectra Physics* (США) *Stabilite 2017*. В качестве излучателя в ней выступает газовый аргоновый ионный лазер. Он излучает на нескольких длинах волн λ , которые находятся в видимом диапазоне 457,9-514,5 нм (фиолетовый, голубой и зелёный). Мощность излучения *Stabilite 2017* – до 8 Вт в режиме всех включенных линий. Система транспортировки и юстировки излучения (трансммиттер) обеспечивает разделение исходного пучка лазера на три луча (различающиеся по цвету – длине волны излучения) и ввод излучения от излучателя в оптические волокна, посредством которых осуществляется далее подвод лучей к оптическим головкам. Из первой оптической головки

(передающей) выходят две пары пучков во взаимно перпендикулярных плоскостях. Зелёные пучки с длиной волны излучения $\lambda_1 = 514,5$ нм (*LDA1*) располагаются в вертикальной плоскости и используются для измерения вертикальной составляющей скорости W_Y (W_{LDA1}); голубые пучки с длиной волны излучения $\lambda_2 = 488$ нм (*LDA4*) располагаются в горизонтальной плоскости и используются для измерения горизонтальной составляющей скорости W_{LDA4} . Из второй оптической головки выходит еще одна пара пучков – фиолетового цвета с длиной волны излучения $\lambda_3 = 476,5$ нм (*LDA5*), они также располагаются в горизонтальной плоскости и используются для измерения второй горизонтальной составляющей скорости W_{LDA5} . Все три пары пучков пересекаются в общей их точке фокусировки, из которой поток рассеянного каплями керосина света (обратный сигнал) воспринимается принимающей оптической головкой. Далее зарегистрированный обратный оптический сигнал («вспышка» от каждой капли) передаётся на аналоговый процессор BSA 80. Процессор BSA 80 задает смещение по частоте лучам, необходимое для их интерференции в исследуемой области. Он так же принимает аналоговый сигнал от капель (от потока рассеянного ими света) и обрабатывает его. Процессор имеет прямую и обратную связь с компьютером. Координатно-перемещающее устройство (КПУ) обеспечивает позиционирование области пересечения лучей (измерительного объёма) в пределах 1010x1010x1010 мм с максимальной скоростью 25 мм/с, точностью 0,1 мм, и управляется с помощью общего компьютера измерительного комплекса.

Объекты и методика испытания при исследовании характеристик распыла керосина – форсуночный модуль, включающий в себя разработанный с позиций динамического конструирования применительно к авиалвигателю ПД-14 экспериментальный образец топливной пневматической форсунки а внутренним воздушным завихрителем (ЭОФ), наружный воздушный завихритель ВЗ1-1, устройства воздействия электрическим полем на топливо в цепи питания форсунки (ЭУВТ) и блоки электропитания к ним (БП). Используется шесть вариантов устройств воздействия электрическим полем на топливо – ЭУВТ-1,

ЭУВТ-2, ЭУВТ-3, ЭУВТ-4, ЭУВТ-5, ЭУВТ-6 и пять вариантов блоков электропитания к ним – БП-1, БП-2, БП-3, БП-4, БП-5. Перечисленные варианты ЭУВТ и БП отличаются своей конструкцией и характеристиками.

На рисунках 5.40 – 5.42 представлены фотографии основных объектов экспериментальных исследований.



Рисунок 5.40 – Разработанный с позиций динамического конструирования экспериментальный образец пневматической форсунки с наружным воздушным завихрителем с улучшенными характеристиками распыла для авиационного двигателя типа ПД-14

Отсек с установленной форсункой представляет собой короткую круглого сечения трубу с общей длиной 170 мм и внутренним диаметром 100 мм. Поток воздуха движется сверху вниз через внутренний воздушный завихритель и наружный воздушный завихритель, установленный на форсунке. Более подробно методика проведения экспериментов изложена автором в [6,24].



Рисунок 5.41 – Электрические устройства воздействия на топливо ЭУВТ-1, ЭУВТ-2, ЭУВТ-3, ЭУВТ-4, ЭУВТ-5, ЭУВТ-6 с различными конструктивными параметрами



Рисунок 5.42 – Электронные устройства ЭУВТ с различными электрическими параметрами выходного напряжения, подаваемого на электроды ЭУВТ

При проведении эксперимента с использованием 3D-LDA-PDA Dantec оптические характеристики каплей керосина определяются заранее и производятся соответствующие настройки в BSA Flow Software. После установке необходимого перепада давления по воздуху и по топливу на исследуемом объекте вводилась область пересечения лазерных лучей в двухфазном потоке с распыленными каплями топлива (командами перемещения для КПУ с помощью программного обеспечения BSA Flow Software). Производилось задействование необходимых каналов измерения скорости и диаметров каплей (*LDA1*, *PDA2*, *PDA3* – для одной компоненты скорости). Каналы *PDA2* и *PDA3*, отвечающие за измерение диаметров каплей, синхронизируются с каналом *LDA1* измерения скорости, так как все эти три канала имеют один и тот же источник зондирования (луч лазера с длиной волны $\lambda = 514,5$ нм). Для одновременного измерения полного вектора скорости выбираются все пять каналов (*LDA1*, *PDA2*, *PDA3*, *LDA4*, *LDA5*). Далее производится настройка параметров дискретизации и чувствительности приемной оптики с помощью программного обеспечения BSA Flow Software. Критерием настройки является максимальное качество принимаемого доплеровского сигнала и максимальная частота сбора данных. Путём подстройки чувствительности каналов *PDA2* и *PDA3* достигается максимум в достоверности сферичности (max→100%). Совмещаются области пересечения лучей и геометрического центра форсуночного модуля. В результате этого системы координат измерителя и форсуночного модуля объединяются в одну. Производится задание точек плана эксперимента, в результате чего образуется массив координат точек исследуемого керосино-воздушного потока.

Результаты эксперимента. Все варианты форсуночного модуля ФМ1.2 в комплектах с различными ЭУВТ и БП испытывались на режиме относительный перепад давлений по воздуху $\Delta \bar{p}_B = 3$ %. Перепада давления по воздуху $\Delta p_1^* = p_1^* - p_H$, где p_1^* – давление воздуха перед форсуночным отсеком, p_H – атмосферное давление. Перепад давления по воздуху на форсунке (воздушном завихрителе) представляется в относительном виде $\Delta \bar{p}_B = p_1^*/p_H$ или в

процентах. Перепад давлений по топливу $\Delta p_T = p_1 - p_H = 2$ ат, где p_1 – давление топлива перед входом в форсунку, p_H – атмосферное давление.

В [6] представлены результаты экспериментальных исследований скоростей и диаметров капель с различными комбинациями ЭУВТ и БП.

Дадим более подробно эти результаты применительно к базовому ЭУВТ-3.

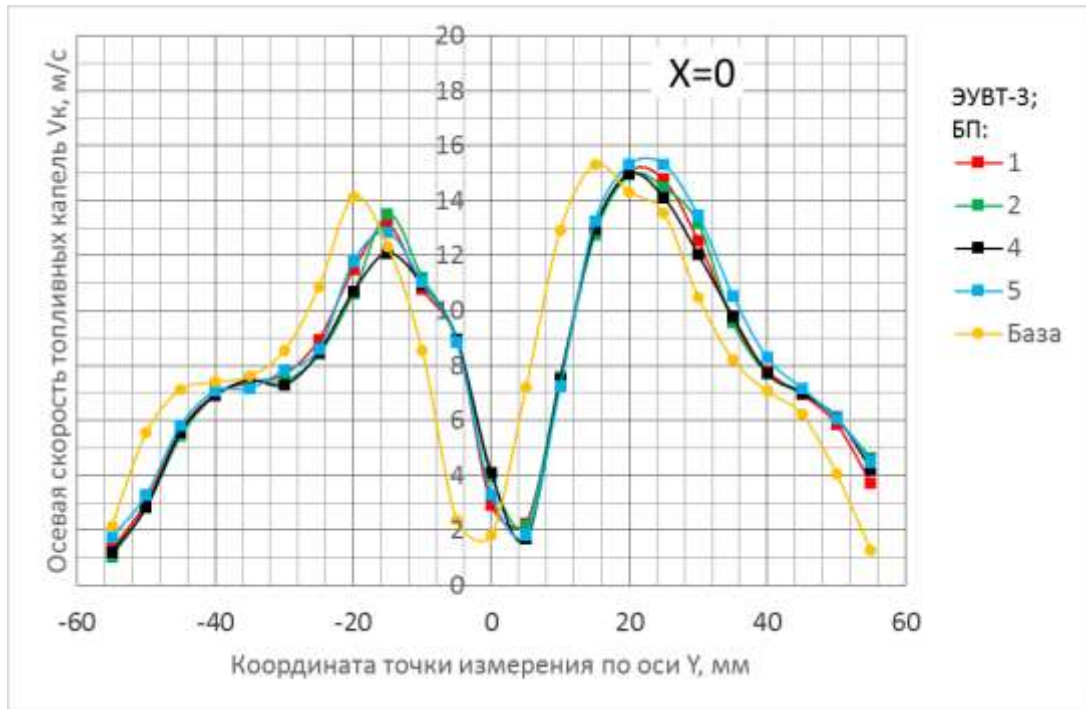
В качестве примера на рисунках 5.45 – 5.46 изображены эпюры средней скорости V_K и диаметров d_K капель керосина ТС-1 для различных вариантов форсуночных модулей. Эпюры представлены для меридиональных сечений ($X=0$ и $Y=0$). Эти параметры: сечение ($X=0$ или $Y=0$), скорость или диаметр, номер БП при одном и том же ЭУВТ-3.

С целью сравнения полученных данных с комплектом «База» на всех рисунках присутствует эпюра с соответствующей характеристикой для ЭОФ без электрического поля в цепи питания форсунки на том же самом режиме $\Delta \bar{p}_B = 3\%$ и $\Delta p_T = p_1 - p_H = 2$ ат.

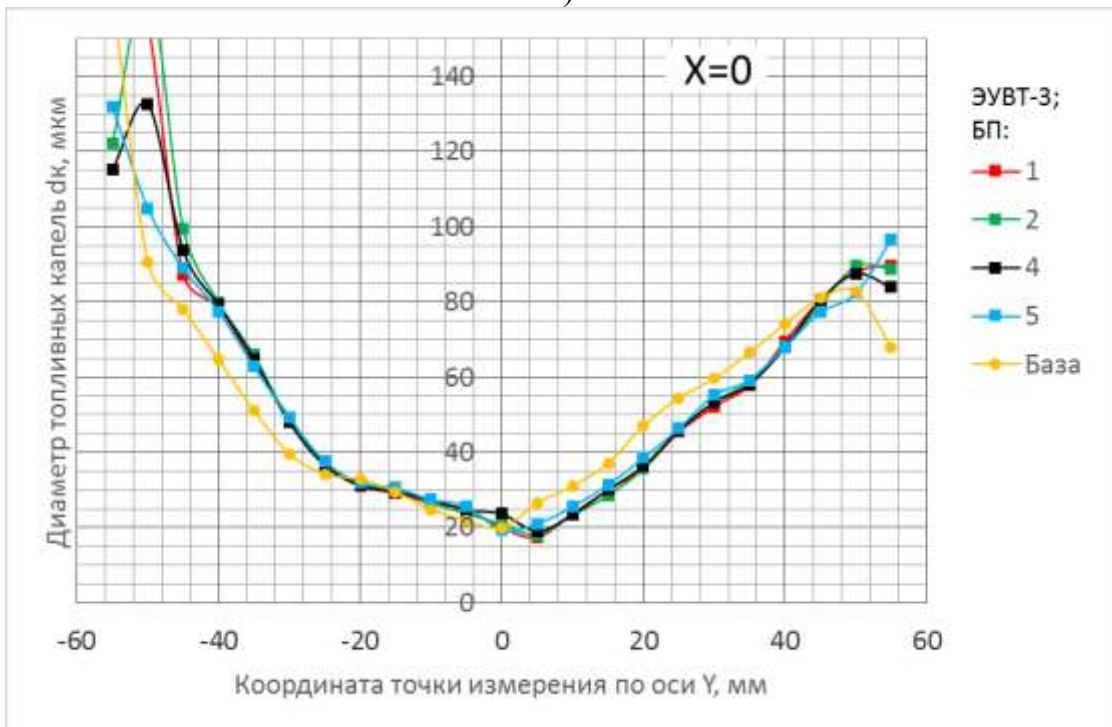
На рисунках 5.45 – 5.46 даны X- и Y-эпюры V_K и d_K для ЭУВТ-3 для разных вариантов блоков питания – БП_i форсуночного модуля.

Как видно из рисунков, форма эпюры скорости соответствует типичному случаю конического факела распыла с «размытыми» внешними границами. На оси факела ($r = 0$) $d_K = 18 - 28$ мкм; на радиусах $r = \pm 20$ мм $d_K = 31 - 34$ мкм (левая ветвь) и $d_K = 35 - 39$ мкм (правая ветвь); на радиусах $r = \pm 50$ мм $d_K = 85...140$ мкм (левая ветвь) и $d_K = 85...88$ мкм (правая ветвь). Максимальная скорость капель керосина $V_{K_{max}} = 12,5 - 15$ м/с, минимальная - $V_{K_{min}} = 1 - 2$ м/с.

Для сравнительного анализа влияния электрических воздействий на скорости и диаметры капель керосина осуществлен подсчёт осреднённых по потоку капель керосина по всему исследуемому поперечному сечению следующих кинематических и дисперсных параметров: D_{10_F} , мкм – средневзвешенный по потоку диаметр капель; D_{32_F} , мкм – среднезаутеровский (средний объёмно-поверхностный)

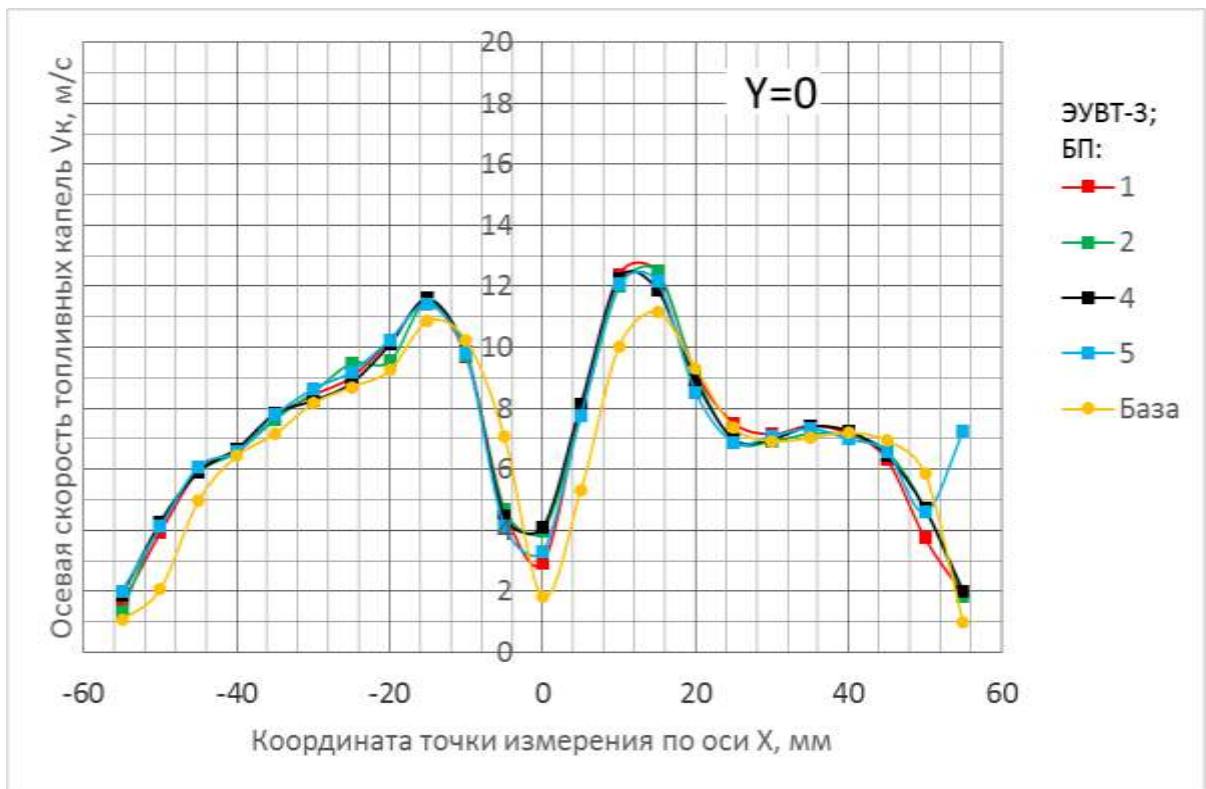


а)

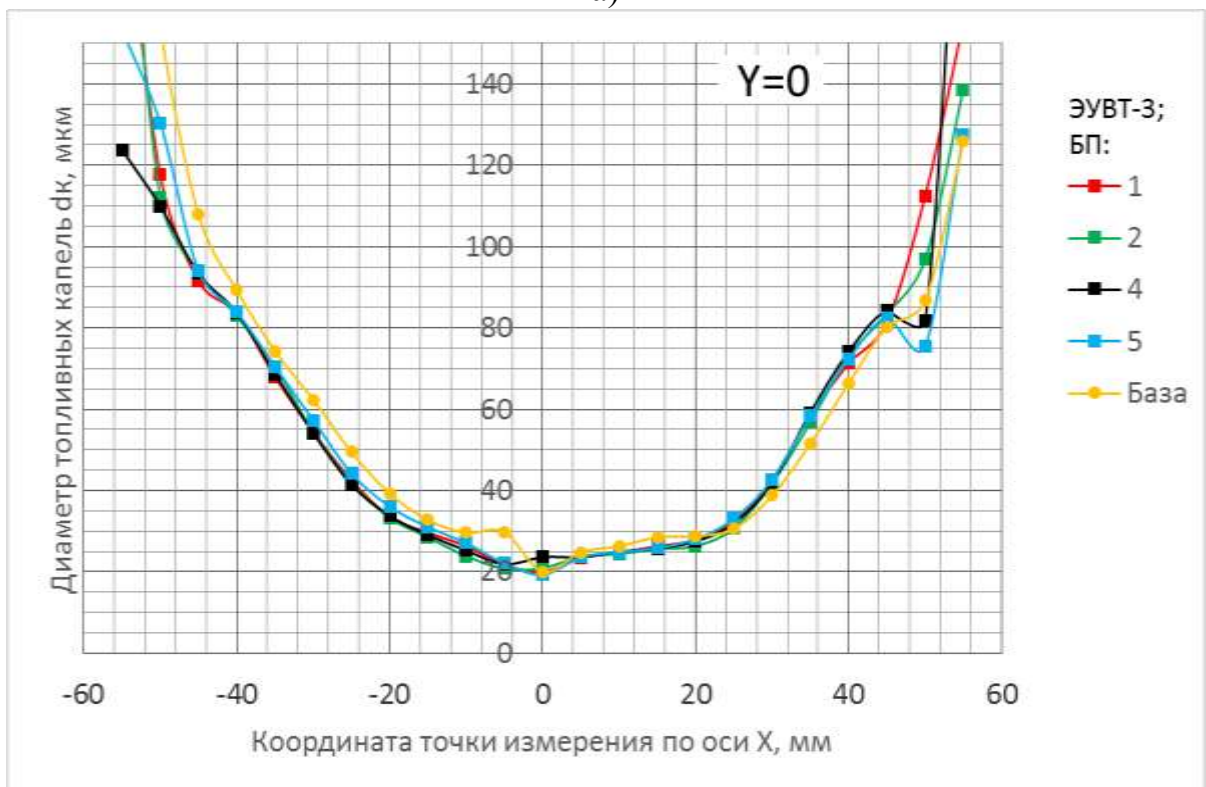


б)

Рисунок 5.45 – Эпюры осевой скорости (а) и диаметров (б) капель керосина форсуночных модулей с ЭОФ для комплектов с ЭУВТ-3 и различными БП ($X = 0$)



а)



б)

Рисунок 5.46 – Эпюры осевой скорости (а) и диаметров (б) капель керосина форсуночных модулей с ЭОФ для комплектов с ЭУВТ-3 и различными БП ($Y = 0$)

диаметр капель керосина; W_{CKB_F} , м/с – средневзвешенная по потоку капель скорость (среднеквадратичное значение); $\Delta\bar{W}_{CKB_F}$, % – среднеквадратичная по потоку капель величина относительной локальной неравномерности скорости (среднеквадратичная по потоку капель относительная разница локальной скорости и средней скорости), вычисляемым по соответствующим формулам:

$$D_{10_F} = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i \cdot \Delta\dot{N}_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta\dot{N}_i}; \quad D_{32_F} = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i^3 \cdot \Delta\dot{N}_i)}{\sum_{i=1}^n (D_i^2 \cdot \Delta\dot{N}_i)}; \quad W_{CKB_F} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i^2 \cdot \Delta\dot{N}_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta\dot{N}_i}}; \quad \Delta\bar{W}_{CKB_F} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\dot{N}_i \cdot \left(\frac{|W_i - W_{CKB_F}}{W_{CKB_F}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \Delta\dot{N}_i}}$$

Нижний индекс «F» означает, что данные параметры подсчитаны как средние по потоку числа капель керосина.

В таблице 5.4 приведены количественные данные указанных выше параметров, а также отклонение этих параметров относительно «Базы» (без электрического поля) при воздействии электрических полей в процентном выражении (в скобках).

Таблица 5.4 – Параметры форсуночного модуля с разработанным с позиций динамического конструирования экспериментальным образцом форсунки с ЭУВТ-3 и различными БП (в скобках показано отклонение от комплекта «База»)

Комплект \ Параметр	База	БП-1	БП-2	БП-4	БП-5
D_{10_F} , мкм (δD_{10} , %)	50,73 (0)	49,71 (-2,01)	48,90 (-3,61)	49,68 (-2,07)	50,28 (-0,89)
D_{32_F} , мкм (δD_{32} , %)	60,41 (0)	59,64 (-1,27)	59,49 (-1,52)	59,88 (-0,88)	60,44 (0,05)
W_{CKB_F} , м/с (δW_{CKB} , %)	8,78 (0)	8,72 (-0,68)	8,63 (-1,71)	8,59 (-2,16)	8,72 (-0,68)
$\Delta\bar{W}_{CKB_F}$, % ($\delta(\Delta\bar{W}_{CKB})$, %)	19,17 (0)	18,77 (-2,09)	19,10 (-0,37)	18,40 (-4,02)	19,12 (-0,26)

В таблице 5.5 приведены соответствующие данные для других ЭУВТ.

По данным, представленным в таблицах 5.4 и 5.3, с учетом результатов исследований для других ЭУВТ можно сделать следующие выводы:

- средние диаметры капель и D_{10_F} , и D_{32_F} при наличии электрического поля оказываются меньше, чем для «базы» для сборки ЭУВТ-4 + БП-1 – на -8 %;
- средние скорости капель и средние неравномерности скорости капель для всех вариантов сборок ЭУВТ_i + БП-1 и ЭУВТ-3 + БП_i также оказываются ниже

значений для «базы» на $\delta W_{CKB} = -0,6...-3 \%$ и $\delta(\Delta\bar{W}_{CKB}) = -0,5...-4 \%$; максимальные отличия данных параметров от «базы» соответствуют сборкам ЭУВТ-4 + БП-1 и ЭУВТ-3 + БП-4.

Таблица 5.5 – Параметры форсуночного модуля с разработанным с позиций динамического конструирования экспериментальным образцом форсунки и с различными ЭУВТ и БП-1 (в скобках показано отклонение от комплекта «База»)

Комплект Параметр	База	ЭУВТ-1	ЭУВТ-2	ЭУВТ-3	ЭУВТ-4	ЭУВТ-6
D_{10F} , мкм (δD_{10} , %)	50,73 (0)	50,67 (-0,12)	48,74 (-3,92)	49,71 (-2,01)	46,36 (-8,61)	48,63 (-4,14)
D_{32F} , мкм (δD_{32} , %)	60,41 (0)	60,68 (0,45)	59,21 (-1,99)	59,64 (-1,27)	55,65 (-7,88)	58,63 (-2,95)
W_{CKBF} , м/с (δW_{CKB} , %)	8,78 (0)	8,76 (-0,23)	8,52 (-2,96)	8,72 (-0,68)	8,25 (-6,04)	8,62 (-1,82)
$\Delta\bar{W}_{CKBF}$, % ($\delta(\Delta\bar{W}_{CKB})$, %)	19,17 (0)	18,79 (-1,98)	18,57 (-3,13)	18,77 (-2,09)	19,08 (-0,47)	18,30 (-4,54)

Уменьшение средней скорости капель керосина при размещении в топливопроводе ЭУВТ непосредственно перед форсункой можно объяснить дополнительным гидравлическим сопротивлением от ЭУВТ.

Таким образом, выбором соответствующей конструкции ЭУВТ и параметров электрического напряжения на электродах ЭУВТ (подаваемого от соответствующих блоков БП) можно уменьшить диаметр капель керосина при его распылении топливной форсункой авиадвигателя.

5.3.4.1 Динамическое конструирование экспериментального образца пневматической форсунки с улучшенными характеристиками распыла топлива как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14

Как уже отмечалось выше, разработана технология динамического конструирования форсуночных модулей с использованием суперкомпьютерных вычислений и верификацией экспериментом результатов численных расчетов применительно к реальным конструкциям форсуночных модулей. На основании полученных результатов разрабатывалась конструкторская документация, изготавливались экспериментальные образцы, которые далее испытывались на современных экспериментальных стендах в СГАУ и АО «ОДК- Авиадвигатель» [39 - 42, 154].

В качестве примера ниже кратко изложена методология динамического конструирования применительно к разработанному ЭОФ как элементу форсуночного модуля при включении ЭУВТ в цепь питания ЭОФ. Таким образом, улучшения процессов распыла топлива достигается как воздействием электрических полей на топливо, так и совершенствованием собственно топливной форсунки авиадвигателя. И в том, и в другом случае используется разработанная технология динамического конструирования. Все это характеризует ее общность.

При численном трехмерном моделировании рассматриваемых нестационарных процессов распыла топлива [5, 28, 162, 73, 161, 11, 13], характерных для авиационных двигателей, решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей с целью получения наибольшего совпадения результатов расчета с полученными экспериментальными данными [6,8, 9, 156, 157, 159]. :

- использованием соответствующих геометрий неравномерных расчетных сеток при существенном увеличении числа элементов расчетной сетки (средний размер расчетной сетки составил порядка 30 миллионов объемных элементов);
- использованием новых подходов к численному моделированию на основе математической модели QMOM;
- трехмерных геометрических моделей реальных конструкций;
- адаптивной схемы иерархического последовательного усложнения модели;
- рациональных вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности:

- метод крупных вихрей LES, когда крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются с использованием большого числа объемных элементов расчетной сетки;
- метод отсоединенных вихрей DES, удачно сочетающий сильные стороны модели SST (RANS), а именно надежность расчета безотрывных течений, с возможностью расчета течений с обширными зонами отрыва, обеспечиваемой моделью LES);
- использованием современных вычислительных сред (ANSYS Fluent, ANSYS ICEM CFD, OpenFOAM), приспособленных к решению таких сложных процессов, как рассматриваемые электрогидродинамические процессы.

Например, в разработанных моделях используются преимущественно гексагональное разбиение расчетной области с дополнительным сгущением в области распыла. При этом в качестве формы элемента используются правильные параллелепипеды и тетраэдры, дающие большую точность в численных расчетах.

На основании проверенных экспериментом разработанных численных моделей проведены численные исследования влияния конструктивных, электрогидроаэродинамических, гидродинамических, электрических параметров на параметры распыла (и горения), обобщены результаты численных исследований, даны рекомендации по выбору и выбраны рациональные параметры электрокаплеструйных форсуночных модулей. Предложены пути дальнейшего совершенствования форсуночных модулей.

Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере оптимизированного при различных режимах работы авиадвигателя с этих позиций образца экспериментальной пневматической форсунки для современного авиадвигателя ПД-14 (ЭОФ), как элемента форсуночного модуля. Для него выбраны (с позиций обеспечения требуемых газодинамических характеристик воздушного потока в форсунке и на выходе из нее, равномерности распределения жидкой фазы в топливно-воздушной смеси. конуса распыла керосина, температурных полей и термонапряженного состояния ЭОФ) рациональные конструктивные параметры: внутренний диаметр сопла форсунки; расположение

внутреннего воздушного завихрителя; угол закрутки газового потока; параметры рабочей жидкости; соотношение чисел Вебера потоков для струй топлива и воздуха (соотношение импульсов потоков струй соответствующих сред); количество тангенциальных топливных пазов и диаметр сопла распылителя форсунки; диаметр сопла наружного воздушного завихрителя с плавным профилем сопла и с конструкцией лопаток с галтелями в области сопряжения с несущими элементами конструкции; скругления в местах с входящими углами.

Для этих параметров в рамках разработанной стратегии исследований впервые изготовлены (см. рисунок 5.40) и экспериментально исследованы ЭОФ (см. предыдущий подраздел), результаты которых подтвердили достоверность разработанных численных моделей.

Установлено, что при полученных на основании численных расчетов конструктивных параметров форсунки максимальные скорости потока воздуха находятся в межлопаточном канале воздушного завихрителя, что обеспечивает стабильность характеристик воздушного потока, обдувающего факел распыла керосина. Кроме того, исключается попадание топлива на поверхность сопла наружного воздушного завихрителя, что в свою очередь улучшает равномерность распределения топлива в окружном направлении, а также обеспечивается долговечность работы форсунки. Определен характер образования и разрушения топливной пленки во времени.

В [319] на основании измерения автором характеристик распыла для экспериментального образца форсунки в составе продувочного устройства показано, что при воздействии электрических полей на керосин в форсуночном модуле ЭУВТ + ЭОФ обеспечивается в реальных условиях работы газотурбинных авиационных двигателей среднезаутеровский диаметр капель керосина меньше 35 мкм.

.Обобщая полученные в этом разделе результаты отметим, что разработаны теоретические модели и методы численного расчета с использованием суперкомпьютерных вычислений с верификацией экспериментом рассматриваемых процессов, позволяющие выбрать рациональные соотношения

между электрическими, гидро(газо)динамическими и конструктивными параметрами электрокаплеструйных форсуночных модулей.

5.4 Выводы по разделу

1. Выбрано базовое электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ) на основании впервые проведенных экспериментальных исследований по влиянию электрических полей на распыл керосина и горения керосиновоздушной смеси в модельной камере сгорания применительно к авиационным двигателям.

2. Разработана методология численного моделирования электрогидродинамических процессов распыла топлива: на базе гидродинамического пакета ANSYS/CFX с использованием метода контрольных объемов и описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в потоке керосина с дополнением основных уравнений электрогидродинамики, уточненной инжекционной модель образования униполярных ионов в резко неоднородном электрическом поле, полученной формулы по влиянию электрического заряда на поверхностное натяжение капель топлива, структурированных гексагональных сеток со сгущением в области сильного резко неоднородного поля с общим количеством ячеек порядка 10 миллионов; итерационной процедуры и явного метода решения по времени, в результате которой на каждом шаге по времени последовательно решались уравнения гидродинамики и электродинамики.

3. Разработаны уточненные численные модели образования и переноса электрического заряда потоком углеводородного топлива: в базовом ЭУВТ, включенном в цепь питания разработанного с позиций динамического конструирования экспериментального образца пневматической форсунки (ЭОФ) и в впервые разработанной применительно к газотурбинным авиадвигателям типа ПД-14 электропневматической форсунке (ЭПФ) с использованием уточненной инжекционной модель образования униполярного электрического заряда в

углеводородном топливе (керосине) в резко неоднородном электрическом поле. Параметры расчетных сеток: количество тетраэдров – около 40 миллионов шт; количество призм - свыше 10 миллионов шт; количество узлов – около 13 миллионов шт.

4. Эффективность разработанной технологии динамического конструирования продемонстрирована на примере конструирования экспериментального образца пневматической форсунки с улучшенными характеристиками распыла топлива как элемента форсуночного модуля применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14. Таким образом показана общность разработанной технологии динамического конструирования на базе суперкомпьютерных вычислений с верификацией экспериментом при создании конкурентоспособного на рынке оборудования с элементами «ноу-хау».

5. Определены величины объемной плотности электрического заряда на выходе ЭУВТ и ЭПФ для их дальнейшего использования для расчёта коэффициента поверхностного натяжения заряженных капель топлива при расчете распыла топлива форсуночными модулями.

6. Показано, что в ряде случаев целесообразно для получения суммарного повышения эффективности распыла и горения включение в цепь питания ЭПФ непосредственно на ее входе ЭУВТ.

7. Разработаны методы повышения точности численных моделей распыла топлива. С позиций увеличения точности расчетов выбрана модель турбулентности на базе полученных результатов суперкомпьютерных вычислений с верификацией известными экспериментальными данными. Показано, что для получения удовлетворительных результатов лучше использовать модель LES, которая, несмотря на большие вычислительные ресурсы, позволяет получать наиболее приемлемые результаты.

8. Проведена отработка процесса численного моделирования задачи распада струи в воздушном потоке в ANSYS Fluent. Показано, что реализация

VOF-модели с использованием адаптивного подсеточного моделирования позволяет выполнять расчеты распада жидкости на капли с высокой точностью.

9. Показано (на базе результатов численного моделирования), что снижения коэффициента поверхностного натяжения капель при сообщении им униполярного электрического заряда приводит к снижению диаметров капель топлива по всему конусу распыла.

10. Выполнено численное моделирование процесса распыла топлива в форсуночном модуле с ЭОФ и ЭПФ для оценки влияния сообщения заряда топливу на распределение диаметров капель. Расчёты полных моделей методом VOF позволили определить распределение скоростей в каналах форсуночных модулей и завихрителя, которые затем были использованы как граничные условия при расчёте упрощенных моделей.

11. Проведена верификация экспериментом основных положений теоретических моделей при численном моделировании процессов распыла топлива в форсуночных модулях. Расчёты в Эйлеровой постановке с подключенным уравнением баланса популяций позволили определить распределение диаметров капель в потоке за форсункой. Для ЭОФ (с ЭУВТ) выполнено сравнение результатов с экспериментом экспериментально подтверждены базовые положения теоретических моделей.

12. Показано [319] на основании измерения характеристик распыла для экспериментального образца пневматической форсунки в составе продувочного устройства, что при воздействии электрических полей на керосин в форсуночном модуле ЭУВТ + ЭОФ обеспечивается в реальных условиях работы газотурбинных авиационных двигателей среднезаутеровский диаметр капель керосина меньше 35 мкм.

6 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ ФОРСУНОК. ВЕРИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ ПРИ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНЫХ ФОРСУНОЧНЫХ МОДУЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГАЗОТУРБИНЫМ АВИАЦИОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ

6.1 Математические модели и методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки. Верификация экспериментом при огневых испытаниях электрокаплеструйных форсуночных модулей

Разработаны методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки с верификацией экспериментом при огневых испытаниях электрокаплеструйных форсуночных модулей. Разработаны методики экспериментальных исследований образцов форсуночных модулей при использовании наиболее хорошо зарекомендовавшей по результатам экспериментальных и теоретических исследований базовой конструкции ЭУВТ (см. рисунок 5.2) [3,7-9,25,74,156,158,159,162,319]. Данные методики прежде всего ориентированы на проведение экспериментальных исследований в ФГАУ ВО Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на современном лазерно-оптическом оборудовании с использованием уникальных научных установок [318].

Объектами исследований являются экспериментальные образцы электрокаплеструйных форсуночных модулей (ЭОФМ), содержащие в своей структуре базовую конструкцию ЭУВТ и различные электрические блоки питания для варьирования параметров электрического напряжения на электродах (см. рисунок 5.42). ЭУВТ включается в топливоподвод непосредственно перед входом керосина типа ТС-1 в топливную форсунку газотурбинного двигателя. Причем в качестве топливной форсунки использована центробежная топливная форсунка ФГУП ММПП «Салют» (г. Москва). В данной форсунке на режимах пониженной мощности топливо подаётся по первому контуру (каналу), на режимах повышенной и максимальной мощности топливо подаётся одновременно по двум контурам (каналам). При огневых испытаниях в СГАУ в составе с модельной камерой сгорания (КС) использован только первый контур при давлении газа внутри самой камеры практически равном атмосферному давлению или близком к нему.

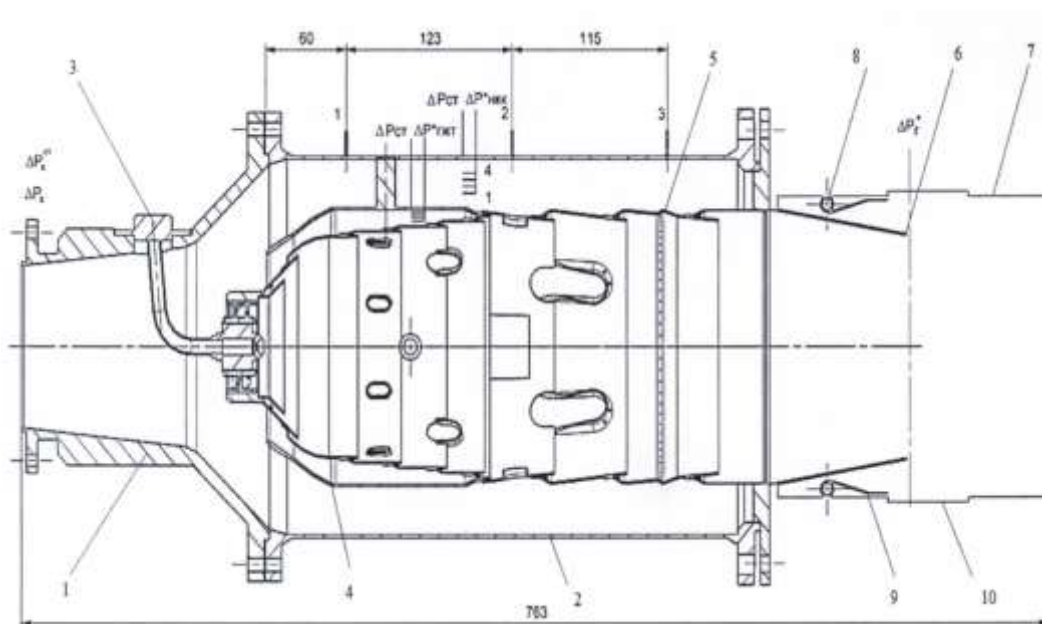


Рисунок 6.1 – Общий вид модельной камеры сгорания СГАУ

1 – диффузор; 2 – корпус камеры сгорания; 3 – двухконтурная центробежная топливная форсунка; 4 – воздухозаборник; 5 – жаровая труба; 6 – газосборник; 7 – проставка; 8 – трубка подвода охлаждающего воздуха; 9 – дефлектор; 10 – окно для установки датчиков системы измерения и кварцевых стекол



Рисунок 6.1,а – Огневые испытания ЭУВТ в СГАУ: сверху под камерой сгорания – ЭУВТ), внизу – модельная камера сгорания

Чертеж общего вида и фотографии с ЭУВТ модельной однофорсуночной камеры сгорания СГАУ с индивидуальной трубчатой жаровой трубой и центробежной топливной форсункой представлена на рисунках 6.1, 6.1,а

6.1.1 Базовые математические модели

Как отмечалось ранее, разработанная технология динамического конструирования при оптимизации процессов распыла керосина и сгорания керосино-воздушной смеси с использованием электрических полей предусматривает, в частности, сравнение теоретических и экспериментальных результатов для подтверждения базовых положений теоретических моделей.

Методологию численного моделирования процесса горения керосино-воздушной смеси покажем на примере модельной камеры сгорания экспериментального стенда СГАУ для огневых испытаний. Данная методология предусматривает построение численной геометрической модели объекта исследования, в данном случае - модельной камеры сгорания, а также разработку расчетной численной модели процессов горения в камере сгорания.

Для описания основных аэродинамических процессов, происходящих при течении топливно-воздушной смеси использовались уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса [191] состоящие из:

- уравнения баланса импульса Навье – Стокса,

$$\frac{\partial \rho_f \mathbf{V}}{\partial t} + \rho_f (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -gradP + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}, \quad (6.1)$$

где тензор напряжений имеет вид

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T - \frac{2}{3} \delta \cdot \nabla \mathbf{V}^2 \right) \quad (6.2)$$

- уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + div(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (6.3)$$

В уравнениях (6.1) – (6.3): \mathbf{V} – вектор скоростей, μ – динамическая вязкость, δ – тензор Кронекера, \mathbf{F} – вектор объемных сил, P – давление.

Течение в рассматриваемой задаче является турбулентным, поэтому необходимо преобразовать исходные уравнения (6.1) – (6.3) с учетом влияния турбулентности. Представим вектор скорости в следующем виде:

$$\mathbf{V} = \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{U} \quad (6.4)$$

В уравнении (6.4) \mathbf{U} – пульсации скорости, $\bar{\mathbf{V}}$ – скорость осредненная по Рейнольдсу:

$$\bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{V} dt \quad (6.5)$$

Подставляя в уравнения (6.1) – (6.3) уравнение (6.5) и применяя процедуру осреднения, получим новую систему уравнений:

$$\rho \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + \rho (\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{V}} = \text{grad} P + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} - \rho \overline{\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}}) \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (6.7)$$

Получившаяся система уравнений (6.6), (6.7) является незамкнутой, так как в ней присутствует тензор турбулентных напряжений $\rho \overline{\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}}$. Для решения этой системы необходимо ввести дополнительные соотношения. В рамках моделирования установившегося режима истечения воздушной среды для разрешения уравнения использовалась SST модель переноса касательных напряжений [186,185], основанная на k- ω модели турбулентности [184]. Использование данной модели обуславливается наличием отрыва потока при наличии неблагоприятного градиента давления, который хорошо прогнозируется и рассчитывается в рамках данной модели. Модель k- ω относится к моделям турбулентности, в основу которых положена гипотеза турбулентной вязкости. Она заключается в том, что турбулентность состоит из маленьких вихрей, которые непрерывно формируются и исчезают, и в которой рейнольдсовы

напряжения принимаются пропорционально значениям градиентов скорости. В основу гипотезы положена следующая формула:

$$\rho \overline{\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}} = -\frac{2}{3} \rho k \delta - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \mathbf{V} \delta + \mu_t (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \quad (6.8)$$

В формуле (6.8) μ_t – турбулентная вязкость.

Введем эффективную вязкость:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (6.9)$$

Подставляя уравнения (6.8) и (6.9) в уравнение (6.6) и опуская верхнюю черту, получим:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nabla \cdot \left(-\left(\frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \mathbf{V} \right) \delta + \mu_{\text{eff}} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \right)$$

В рамках модели k - ω турбулентная вязкость принимается равной:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (6.10)$$

В формуле (6.10) k – кинетическая энергия турбулентности, ω – турбулентная частота. Для нахождения величин k и ω решаются дифференциальные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и турбулентной частоты [207]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) &= \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \beta' \rho k \omega \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \omega) &= \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2, \end{aligned} \quad (6.11)$$

где
$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{V} \cdot (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} (3\mu_t \nabla \cdot \mathbf{V} + \rho k)$$

Здесь $\alpha = 5/9$, $\beta = 0.075$, $\beta' = 0.09$, $\sigma_k = 2$, $\sigma_\omega = 2$ – эмпирические коэффициенты.

В рамках SST модели принимается следующий вид турбулентной вязкости:

$$\mu_t = \frac{a_1 k \rho}{\max(a_1 \omega; S F_2)}$$

F_2 – стыковочная функция, S – инвариантная мера скорости деформации

$$F_2 = \tanh(\arg \frac{2}{2})$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)$$

Здесь y – расстояние до ближайшей границы твердого тела камеры сгорания.

Для описания турбулентных процессов, возникающих в рассматриваемой задаче, использовалась SST модель турбулентности, реализованная в пакете численного моделирования ANSYS/CFX [320 - 323].

Моделирование течения топлива в воздушном пространстве относится к расчету, так называемого, многофазного течения с двусторонним взаимодействием фаз. В общем случае также, с возможностью осуществления фазовых переходов (испарение, конденсация, кипение). Для моделирования подобных физических явлений в области численного моделирования используются два основных подхода: Эйлеров (см. 5 главу настоящей диссертации) и Лагранжевый, на который будем ориентироваться при разработке численных моделей процессов горения керосино-воздушной смеси.

Лагранжев подход представлен моделью Particle Transport Model (модель переноса частиц). Описание движения топлива методом Лагранжа сводится к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных для каждой капли топлива. Так, в начальный момент времени капли находились в точках 1, 2, 3 и 4. По истечении некоторого времени они переместились в точки: 1', 2', 3' и 4', причём это перемещение сопровождалось изменением объёмов и форм капель - упругой деформацией. Тогда можно утверждать, что капли топлива при своём движении участвуют в трёх видах движения: поступательном, вращательном и деформации. Для описания такого сложного движения топлива необходимо, таким образом, определить как траектории капель, так и характеристики капель, таких как плотность, температура и скорость как функции времени и координат.

При Лагранжевом подходе капли топлива двигаются под действием совокупности сил, представленных на рисунке 6.2.

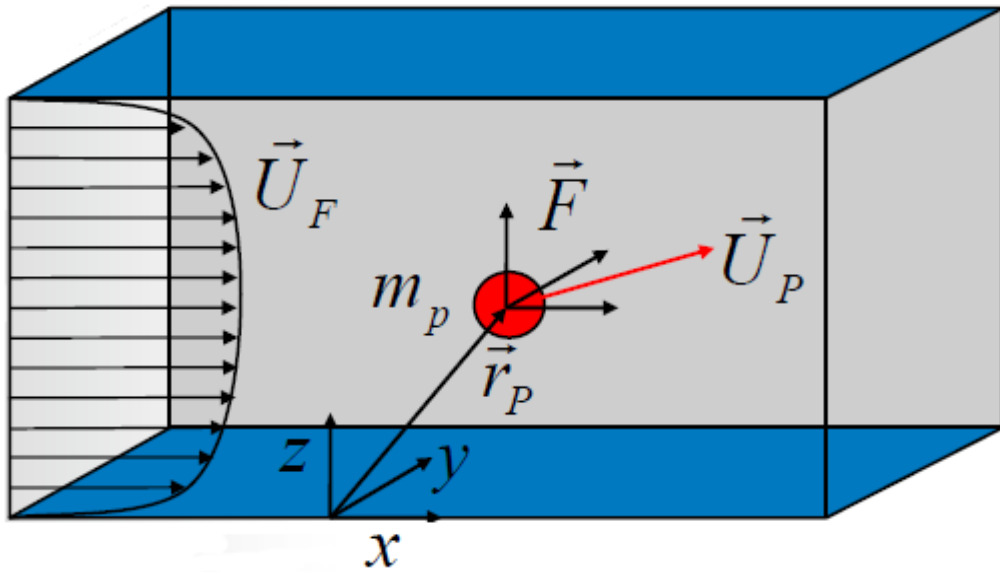


Рисунок 6.2 – Силы, действующие на каплю топлива

Рассмотрим математическую модель транспорта капель топлива, основанную на решении уравнения движения с учетом влияния потока несущей газовой смеси. В модели учитывается возможность дробления капель, в результате которых происходит формирование более мелких капель топлива [46,139,142-144, 172,314].

При моделировании движения капель будем полагать, что капли топлива не оказывают влияния на поток газа в силу их относительно малой концентрации.

Для нахождения траектории движения некоторой выделенной i -й капли топлива используется уравнение движения в координатах Лагранжа:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{u}_p, \quad (6.12)$$

$$\frac{\pi d_i^2}{6} \rho \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (6.13)$$

где индекс p указывает на принадлежность капле, r – радиус-вектор положения, u – скорость, ρ – плотность, а d – диаметр капли, правая часть уравнения (6.13) есть баланс всех сил, действующих на каплю.

Покомпонентную запись уравнения (6.13) в декартовых координатах для единичной массы можно записать следующим образом:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_p - u) + (F_g + g) + F_t, \quad (6.14)$$

где u_p – скорость выделенной капли, u – скорость среды, $F_D(u_p - u)$ – сила сопротивления потоку, $(F_g + g)$ представляет собой силу градиента давления и гравитационное воздействие, F_t – вклад термофоретической силы (термофорез – явление отталкивания частиц со стороны газообразной фазы из области с большей температурой в область с меньшей).

Выражение для силы трения (также называемой силой лобового сопротивления потоку), действующей на сферические объекты в вязкой жидкости было получено Стоксом

Для величины силы воздействия потока на каплю, отнесенной к единице массы в форме (6.14) получаем:

$$F_D = \frac{6\pi r \eta (u - u_p)}{\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot (u - u_p)} = \frac{18\eta}{d^2 \rho}$$

Рассматриваем силу лобового сопротивления потоку в форме:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A |(u - u_p)| (u - u_p)$$

где A – площадь в проекции капли в направлении движения, тогда $A |(u - u_p)|$ – объем, занимаемый каплей при движении со скоростью $|(u - u_p)|$ относительно скорости среды, ρ – плотность капельной среды, C_D – коэффициент лобового сопротивления, r – радиус сферической капли, η – динамический коэффициент вязкости среды, u_p – скорость капли топлива, u – скорость среды.

Для высокоскоростных течений с величиной числа Рейнольдса в диапазоне от 1000 до 200000, коэффициент лобового сопротивления инвариантен от числа Рейнольдса и может быть выбран:

$$C_D \approx 0.44$$

Для $0.1 < Re < 1000$ для сферических объектов вязкостные и инерционные эффекты имеют важное значение. Для таких течений коэффициент лобового сопротивления является сложной функцией от величины числа Рейнольдса:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$$

Обобщением подходов, для самого широкого диапазона чисел Рейнольдса может быть принята модель:

$$C_D = \max \left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), 0.44 \right)$$

В потоке сплошной среды всегда существует градиент давления, который может быть обусловлен гравитацией, торможением или ускорением потока. Во всех этих случаях на каплю будет действовать сила, обусловленная градиентом давления. Сила градиента давления, например, при ускорении потока, действующая на шарообразную каплю топлива, вычисляется по известной формуле:

$$\vec{F}_g = -grad p \frac{\pi d^3}{6},$$

где p – давление, d – диаметр капли топлива.

На каждую каплю, в согласии с уравнением (6.13) действует сила на единицу массы капли топлива. Выражение для такой силы:

$$\vec{F}_g = \frac{-grad p \frac{\pi d^3}{6}}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho} = \frac{-grad p}{\rho}$$

Фазовые переходы для капель топлива, обладающих свойствами тепло – и массопереноса, в разрабатываемой методике учитываются моделью испарения капель. Модель использует два соотношения переноса массы в зависимости от того в каком состоянии находится капля топлива: выше или ниже точки кипения.

Точка кипения определяется с помощью уравнения Антуана [325], которое определяет давление газа как функцию температуры:

$$p_{var} = p_{scale} \exp\left(A - \frac{B}{T+C}\right) \quad (6.15)$$

Величина p_{scale} является коэффициентом масштабирования давления. Коэффициенты A , B и C в (6.15) определяются для конкретного типа топлива. A – коэффициент относительного состояния Антуана. B – коэффициент энтальпии Антуана. C – температурный коэффициент Антуана. Значения коэффициентов для различных веществ можно найти в соответствующих таблицах.

Капля топлива считается закипевшей, если значение величины p_{var} превышает атмосферное давление газа $p_{ambient}$.

Когда состояние капли топлива оказывается выше точки кипения, то перенос массы определяется соотношением:

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{Q_C + Q_R}{V} \quad (6.16)$$

где V – скрытая теплота испарения капли (теплота, выделяемая при изменении фазового состояния без изменения температуры). Q_C и Q_R – это конвективный и лучистый теплообмен соответственно.

Когда состояние капли топлива ниже точки кипения, то перенос массы определяется отношением:

$$\frac{dm}{dt} = \pi d_p \rho D Sh \frac{W_C}{W_G} \ln\left(\frac{1 - \chi_s^V}{1 - \chi_{vap}^V}\right) \quad (6.17)$$

где d_p – диаметр капли, ρD – динамический коэффициент диффузии, Sh – число Шервуда. W_C и W_G – молекулярный вес газа и смеси в фазе сплошной среды. χ_s^V – молярная доля испаряющихся капель топлива в состоянии равновесия. χ_{vap}^V – молярная доля испаряющейся капли топлива в газообразном состоянии.

Источник массы сплошной жидкой среды определяется из соотношения:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dm}{dt} \quad (6.18)$$

Для моделирования вторичного распыла использовалась модель МСАВ, являющаяся модернизацией модели САВ (Cascade Atomization and Drop Break-up) [326]. При использовании данной модели предполагается, что капля топлива при определенных значениях числа Вебера (We) распадается на более мелкие капли. При этом радиус первичной капли топлива и радиус вторичных капель связаны соотношением:

$$\frac{r_{втор}}{r_{пер}} = e^{-K_{bu} t}, \quad (6.19)$$

где

$$K_{bu} = \begin{cases} k_1 \omega, & \text{если } 5 < We < 80 \\ k_2 \omega \sqrt{We}, & \text{если } 80 < We < 350. \\ k_3 \omega We^{3/4}, & \text{если } 350 < We \end{cases} \quad (6.20)$$

Здесь, k_1, k_2, k_3, ω – внутренние переменные модели [326].

Рассматривается горение керосино-воздушной смеси, которое протекает в диффузионном режиме. Проблема моделирования турбулентного диффузионного пламени связана с необходимостью определения средних скоростей химических реакций. Поскольку зависимость скорости реакции от температуры является сильно нелинейной, подстановка средней температуры в выражение для скорости реакции не позволяет получить значение средней скорости реакции. Для ее расчета требуется специальная модель – модель турбулентного горения. Турбулентное горение моделируем *по средней скорости реакции*. Этот подход направлен на приближенное определение средней скорости потребления (или образования) компонентов в турбулентном пламени за счет всех химических реакций. Подстановка средней скорости реакции в правую часть осредненного уравнения переноса компонентов позволяет решить указанное уравнение в требуемой области пространства и рассчитать поля средних концентраций.

Используем *модель дробления вихрей* [46, 314,329]. Данный подход направлен на определение средней скорости реакции \tilde{r}_α и решение осредненных уравнений переноса компонентов смеси:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_\alpha}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j'' Y_\alpha''}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{F}_{j,\alpha}}{\partial x_j} + \tilde{r}_\alpha. \quad (6.21)$$

Основная идея метода состоит в том, что в диффузионном режиме горения топливно-воздушной смеси скорость потребления реагентов не зависит от кинетики реакции, а определяется скоростью турбулентного смешения реагентов с характерным масштабом времени k/ε , что было впервые предложено в работах Сполдинга. Такое допущение справедливо при большой скорости реакции в условиях развитой турбулентности. В этом приближении скорость выгорания и образования компонент выражается через средние значения концентраций реагентов и продуктов. В результате, в работе Магнуссена и Хьертагера [329] было предложено следующее выражение для средней скорости \tilde{r}_α :

$$\tilde{r}_\alpha = A \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\tilde{Y}_{fuel}, \frac{\tilde{Y}_{ox}}{s_{ox}}, B \frac{\tilde{Y}_{prod}}{1 + s_{ox}} \right), \quad (6.22)$$

где s_{ox} – массовый стехиометрический коэффициент окислителя, $A = 4.0$ и $B = 0.5$ – модельные константы. Третий аргумент, который иногда опускают, учитывает возможность инициирования горения горячими продуктами.

В случае использования модели крупных вихрей, характерная скорость смешения ε/k заменяется подсеточной скоростью смешения τ_r^{-1} :

$$\tau_r^{-1} = \left(\sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \right), \quad (6.23)$$

где $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор скоростей деформаций разрешенного поля скорости.

Здесь следует отметить, что эти модели не ориентированы для расчета концентраций продуктов неполного сгорания, например CO и NO . Однако в этом

разделе нас прежде всего интересует распределение температур в модельной камере сгорания с верификацией экспериментом.

В многокомпонентных реагирующих смесях при определенном наборе допущений можно построить величины, называемые пассивными скалярами, которые сохраняются при протекании химических реакций и изменяются только за счет процессов переноса [327]. Использование этих величин может существенно упростить описание диффузионного горения. При комбинировании уравнений переноса концентрации горючего и компонента смеси получается линейное однородное уравнение (при условиях одностадийной необратимой реакции и одинаковой молекулярной диффузии):

$$\frac{\partial \rho(Y_{fuel} - Y_{\alpha} / s_{\alpha})}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j (Y_{fuel} - Y_{\alpha} / s_{\alpha})}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D_{\alpha} \frac{\partial (Y_{fuel} - Y_{\alpha} / s_{\alpha})}{\partial x_j} = 0 \quad (6.24)$$

Так как источники и стоки в уравнении (6.24) отсутствуют, величина $z_{\alpha} = Y_{fuel} - Y_{\alpha} / s_{\alpha}$ в ходе реакций не изменяется. Любая скалярная величина, линейно связанная с z_{α} , удовлетворяет уравнению (6.24). Такие величины называются пассивными скалярами. Среди них выберем такую, которая изменяется от нуля в потоке окислителя до единицы в потоке горючего [327]:

$$Z_{\alpha} = \frac{z_{\alpha} - z_{\alpha}^{air}}{z_{\alpha}^{fl} - z_{\alpha}^{air}} = \frac{Y_{fuel} - Y_{\alpha} / s_{\alpha} - (Y_{fuel}^{air} - Y_{\alpha}^{air} / s_{\alpha})}{Y_{fuel}^{fl} - Y_{\alpha}^{fl} / s_{\alpha} - (Y_{fuel}^{air} - Y_{\alpha}^{air} / s_{\alpha})}. \quad (6.25)$$

Пассивный скаляр называется переменной смешения, если в качестве используемого в уравнении компонента α взять окислитель:

$$Z = \frac{Y_{fuel} - Y_{ox} / s_{ox} - (Y_{fuel}^{air} - Y_{ox}^{air} / s_{ox})}{Y_{fuel}^{fl} - Y_{ox}^{fl} / s_{ox} - (Y_{fuel}^{air} - Y_{ox}^{air} / s_{ox})}. \quad (6.26)$$

В уравнении (6.26) под нижними индексами *fuel* и *ox* понимается массовая доля чистого горючего и чистого окислителя соответственно. Под верхними индексами *air* и *fl* понимается значение массовой доли в потоках «воздуха» или «горючего» соответственно.

Наличие внешнего теплообмена требует введения доли теплопотерь:

$$f_r = \frac{h_{ad}(Z) - h}{h_{ad}(Z) - h_{\min}}, \quad (6.27)$$

где h – фактическая энтальпия смеси, полученная из уравнения переноса, а $h_{ad}(Z)$ – адиабатическая энтальпия, полученная по переменной смешения и не учитывающая наличие теплотерь.

В этом случае зависимости температуры, плотности и концентраций компонентов от переменной смешения будут являться функциями двух аргументов: $\varphi = \varphi(Z, f_r)$. Для построения таких зависимостей можно использовать модель одностадийной, необратимой, бесконечно быстрой реакции (модель Бурке-Шумана), модель химического равновесия или модель микроламинарного пламени [74].

Предположение химического равновесия означает бесконечную малость времени релаксации, через которое наступает локальное равновесие между прямыми и обратными реакциями. Методы термодинамики позволяют с высокой точностью рассчитать термохимические параметры смеси (состав, температура, давление) в условиях химического равновесия, если известен состав исходных реагентов (см., например, [328]).

В основе модели микроламинарного пламени лежит предположение об универсальности зависимостей концентраций компонентов Y_α и температуры T от переменной смешения Z при произвольных механизмах реакций. При этом используется допущение о том, что зона реакции является тонкой по сравнению с радиусом кривизны, в результате чего малый элемент поверхности пламени является почти плоским, а само пламя локально одномерно. Переходя в локальную систему координат такого элемента и пренебрегая производными по касательным к поверхности пламени, можно получить следующие уравнения переноса компонент:

$$\frac{\partial Y_\alpha}{\partial t} = \dot{r}_\alpha(Y_\alpha, T) + \frac{1}{2} \chi \frac{\partial^2 Y_\alpha}{\partial Z^2}, \quad (6.28)$$

где χ – скалярная диссипация:

$$\chi = 2D \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_3} \right)^2 \right]. \quad (6.29)$$

6.1.2 Методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

Построение САД-модели модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя. Входными данными для построения САД-модели камеры сгорания являются чертежи модельной камеры сгорания СГАУ (рисунки 6.1, 6.3, 6.4). Основной чертеж представлен на рисунке 6.1, вспомогательный чертеж, с более подробным указанием составляющих модельной камеры сгорания представлен на рисунке 6.3. На рисунке 6.3 введены обозначения: 1 – мерный участок, 2 – диффузор, 3 – центробежная форсунка, 4 – завихритель, 5 – стенка канала воздухозаборника, 6 – канал воздухозаборника, 7 – корпус камеры сгорания, 8 – внешний кольцевой канал, 9 – отверстие подвода воздуха в зону смешения, 10 – смеситель, 11 – газосборник, 12 – смотровые стекла, 13 – проставка, 14 – газоотводящая труба.

Подробный чертеж завихрителя, представлен на рисунке 6.4. Основные геометрические параметры камеры сгорания представлены в таблице 6.1.

По имеющимся чертежам, представленным на рисунках 6.1, 6.3, 6.4, разработана САД-модель камеры сгорания в пакете САПР SolidWorks. Выбор величин всех размеров модельной камеры сгорания, необходимых для построения САД-модели, осуществлен на основании: размеров, представленных на рисунках 6.1, 6.3, 6.4; геометрических параметров камеры сгорания, представленных в таблице 6.1; правила масштабирования для чертежей.

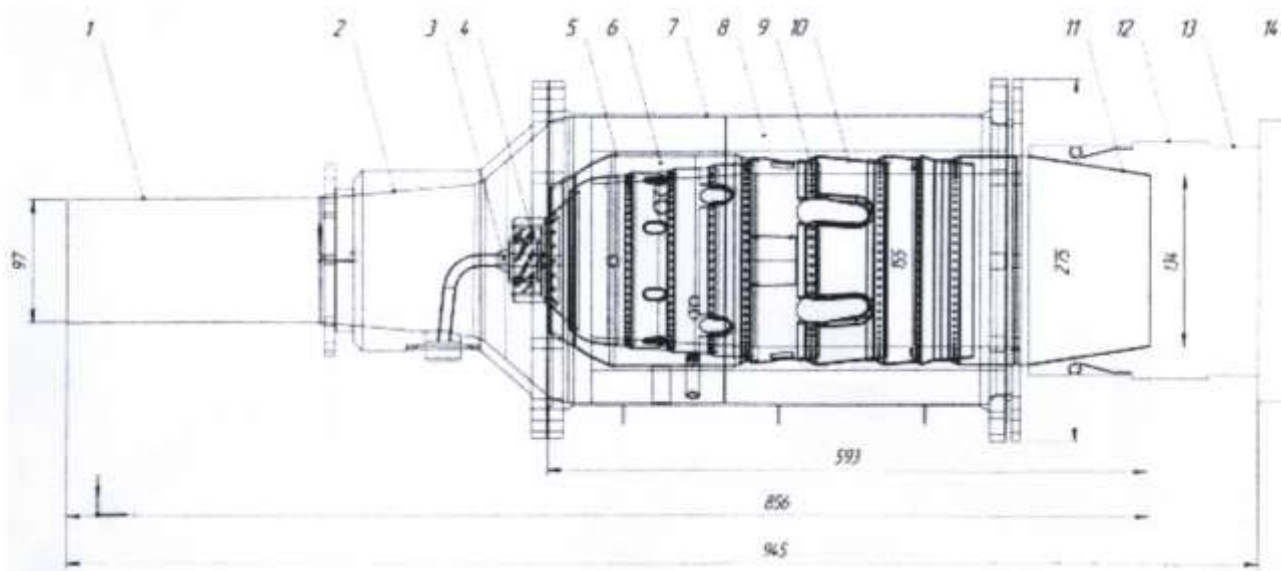


Рисунок 6.3 – Вспомогательный чертеж модельной камеры сгорания

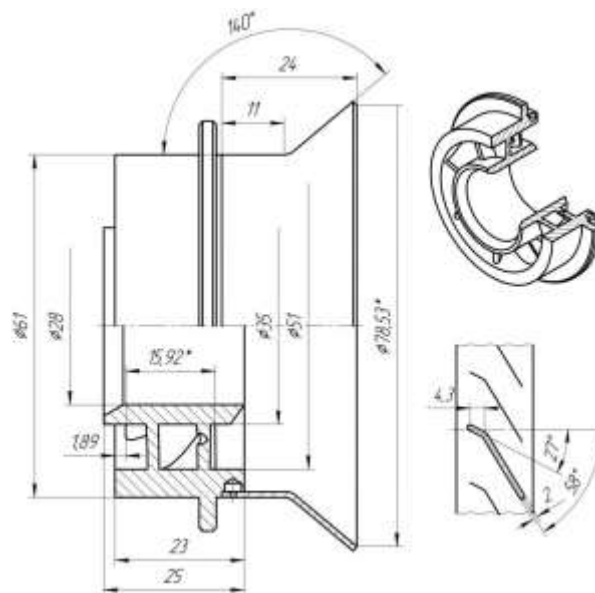


Рисунок 6.4 – Завихритель модельной камеры сгорания

Таблица 6.1 – Геометрические параметры модельной камеры сгорания

Характеристика	Обозначение и единица измерения	Величина
Диаметр на входе в камеру сгорания	$D_K, 10^{-4} \times м$	970
Диаметр на выходе из газосборника	$D_G, 10^{-4} \times м$	1330
Площадь на входе в камеру сгорания	$F_K, 10^{-4} \times м^2$	73,9
Площадь на выходе из газосборника	$F_G, 10^{-4} \times м^2$	138,9
Площадь проходного сечения завихрителя	$F_3, 10^{-4} \times м^2$	24,6
Суммарная площадь отверстий в жаровой трубе с учетом завихрителя	$F_{ОЖТ}, 10^{-4} \times м^2$	104,69
Площадь отверстий смесителя для базового варианта	$F_{ОСМ}, 10^{-4} \times м^2$	40,17
Площадь наружного кольцевого канала в месте установки гребенки полного давления	$F_{НКК}, 10^{-4} \times м^2$	177,65
Площадь кольцевого канала головки жаровой трубы в месте установки гребенки полного давления	$F_{ККТ}, 10^{-4} \times м^2$	46,11

Общие геометрические виды CAD–модели камеры сгорания представлены на рисунках 6.5–6.6.



Рисунок 6.5 – CAD–модель модельной камеры сгорания , вид в изометрии

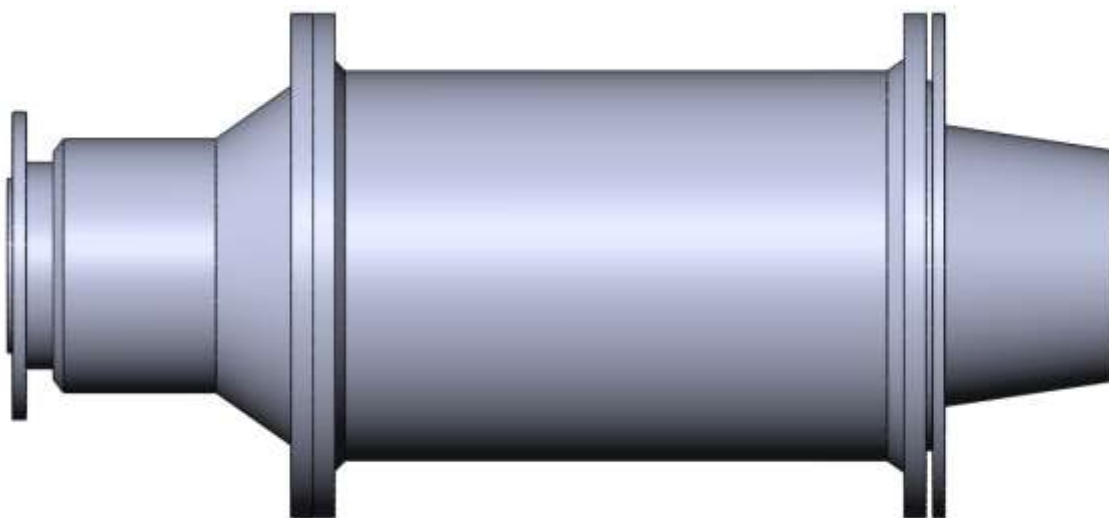


Рисунок 6.6 – CAD–модель модельной камеры сгорания СГАУ,
вид сбоку

Продольное сечение CAD–модели камеры сгорания и жаровой трубы представлены на рисунках 6.7 и 6.8 соответственно. Поперечное сечение CAD–модели камеры сгорания для групп отверстий представлено на рисунках 6.9–6.11.

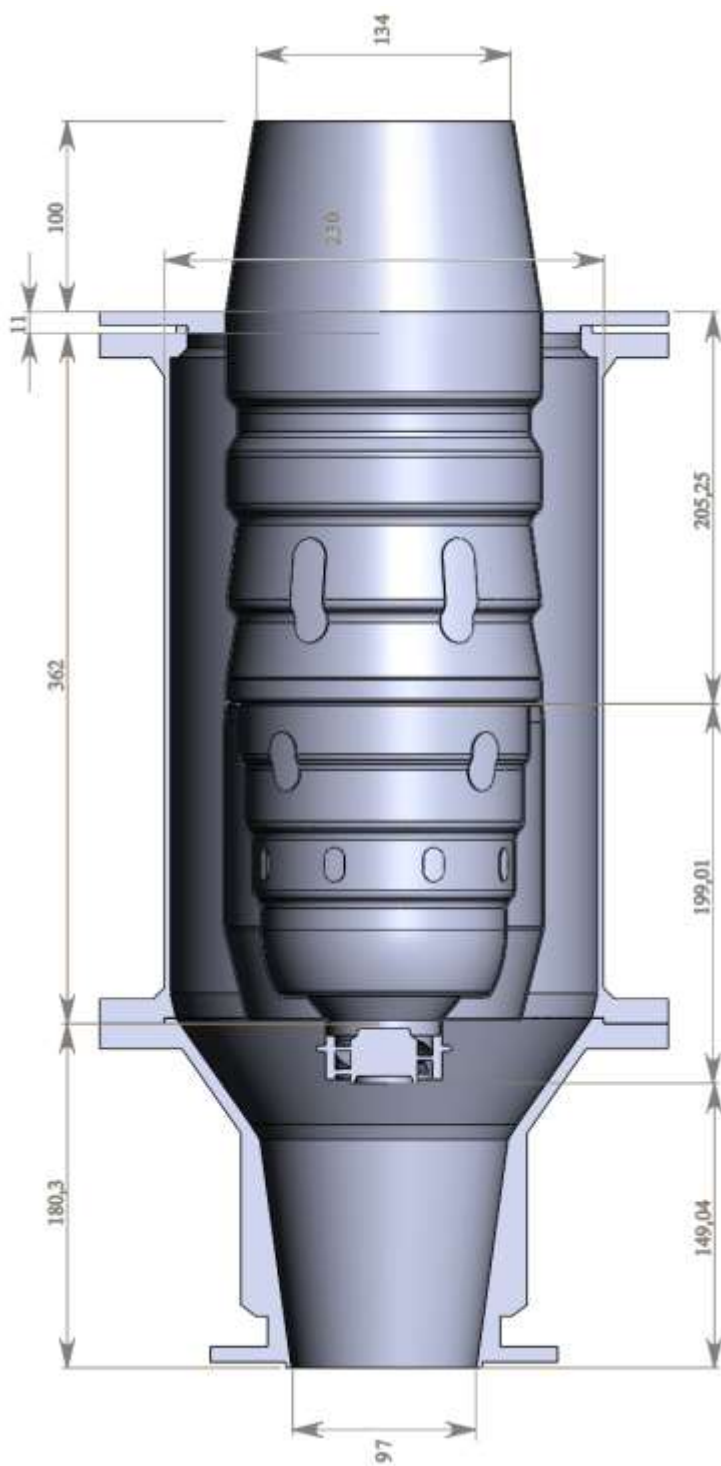


Рисунок 6.7 – CAD-модель модельной камеры сгорания,
продольное сечение

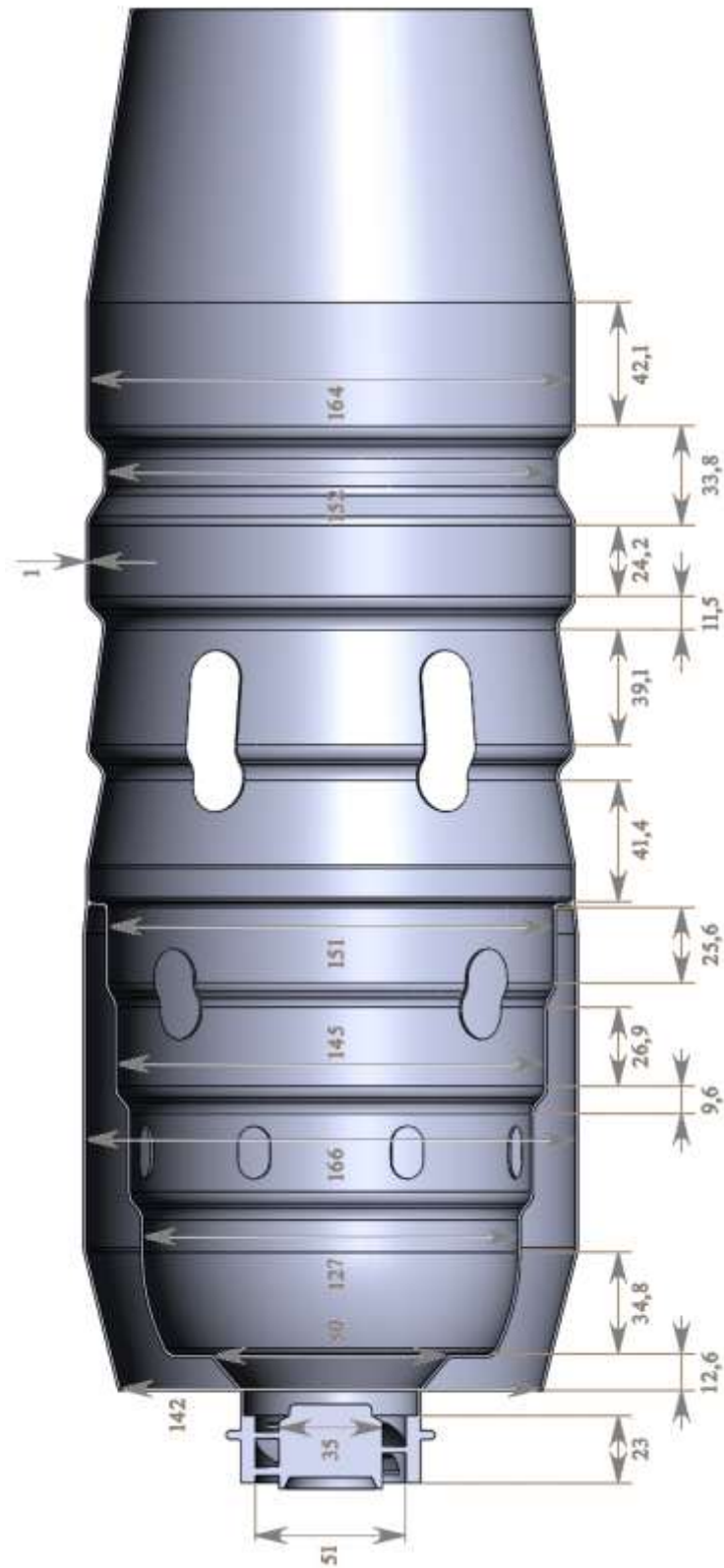
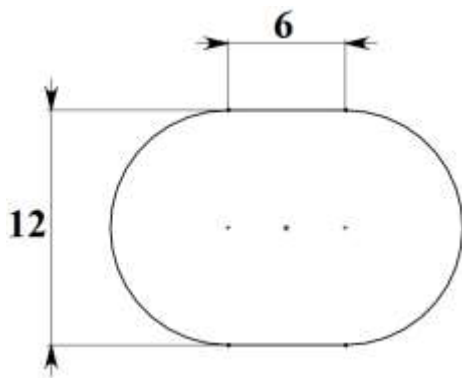
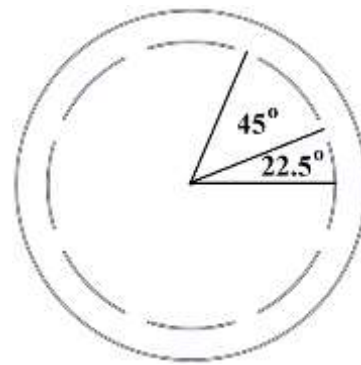


Рисунок 6.8 – CAD-модель жаровой трубы, продольное сечение

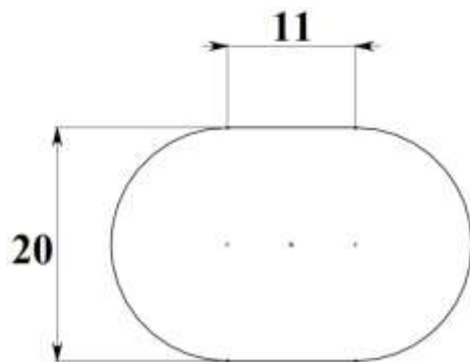


Форма отверстия

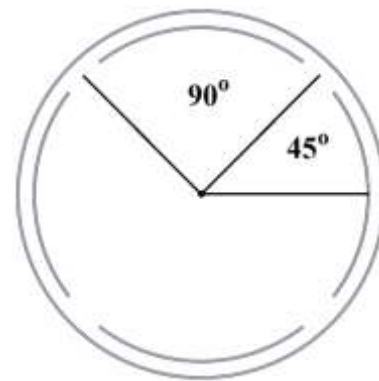


Периодичность отверстия

Рисунок 6.9 – CAD-модель модельной камеры сгорания, поперечное сечение для первой группы отверстий жаровой трубы со стороны авихрителя

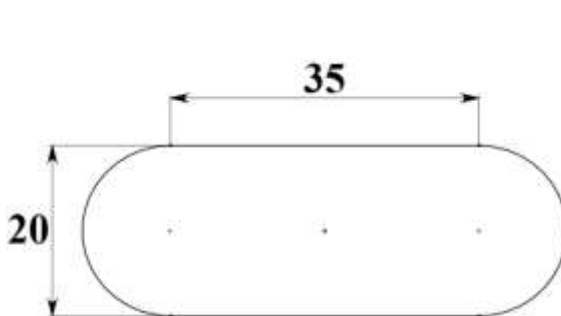


Форма отверстия

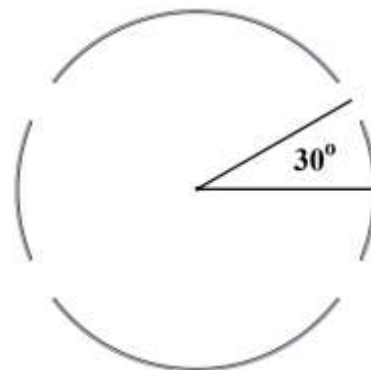


Периодичность отверстия

Рисунок 6.10 – CAD-модель модельной камеры сгорания, поперечное сечение для второй группы отверстий жаровой трубы со стороны авихрителя



Форма отверстия



Периодичность отверстия

Рисунок 6.11 – CAD-модель модельной камеры сгорания, поперечное сечение для третьей группы отверстий жаровой трубы со стороны завихрителя

Разработка CAD-модели проточной части. По разработанной CAD-модели камеры сгорания построена CAD-модель проточной части, представленная на рисунках 6.12–6.13 в пакете САПР SolidWorks.

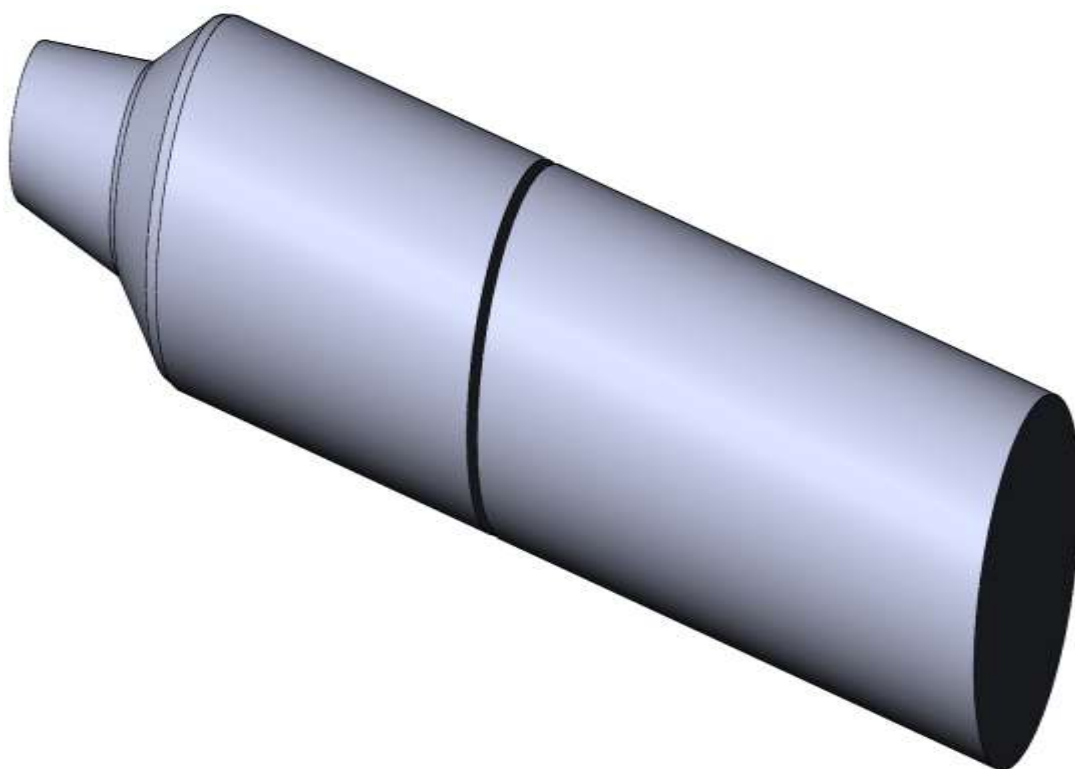
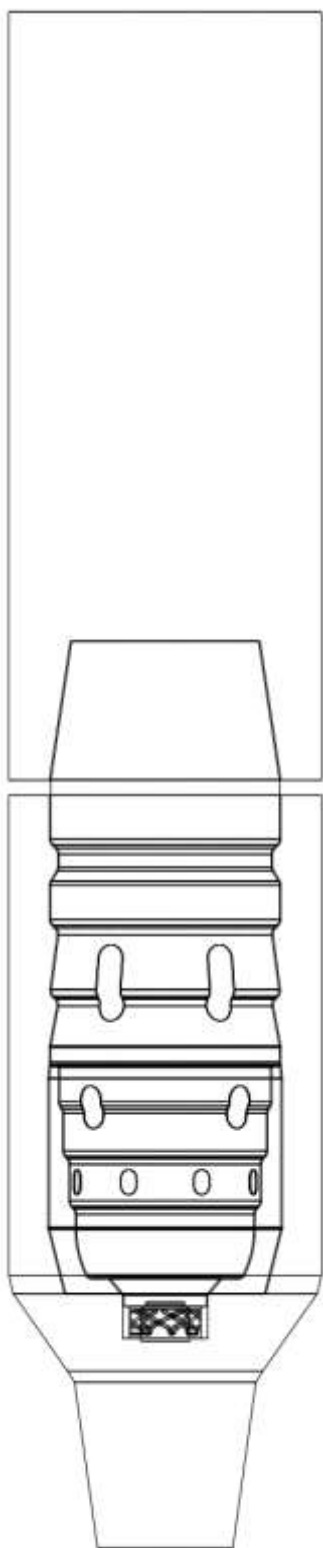
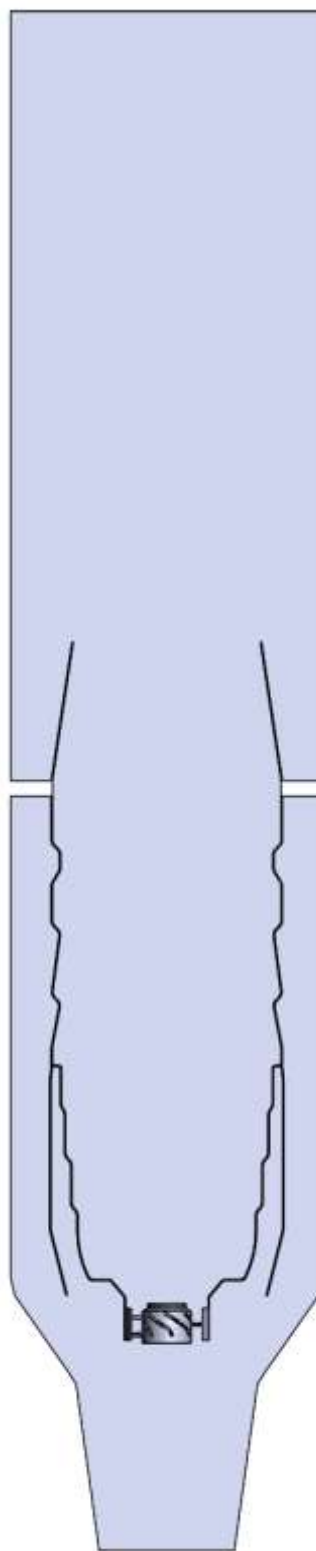


Рисунок 6.12 – CAD-модель проточной части модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя,
вид в изометрии



Вид сбоку, каркасное представление



Продольное сечение

Рисунок 6.13 – CAD-модель проточной части модельной камеры сгорания газотурбинного двигателя

Разработка численной расчетной модели модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя. Для выполнения численного моделирования процесса горения в модельной камере сгорания на основе геометрической модели построена расчетная 3D модель, учитывающая функциональные элементы КС и состоящая из входного диффузора, завихрителя, подэкранного пространства и жаровой камеры и смесителя. Сеточная модель изображена на рисунках 6.14- 6.15.

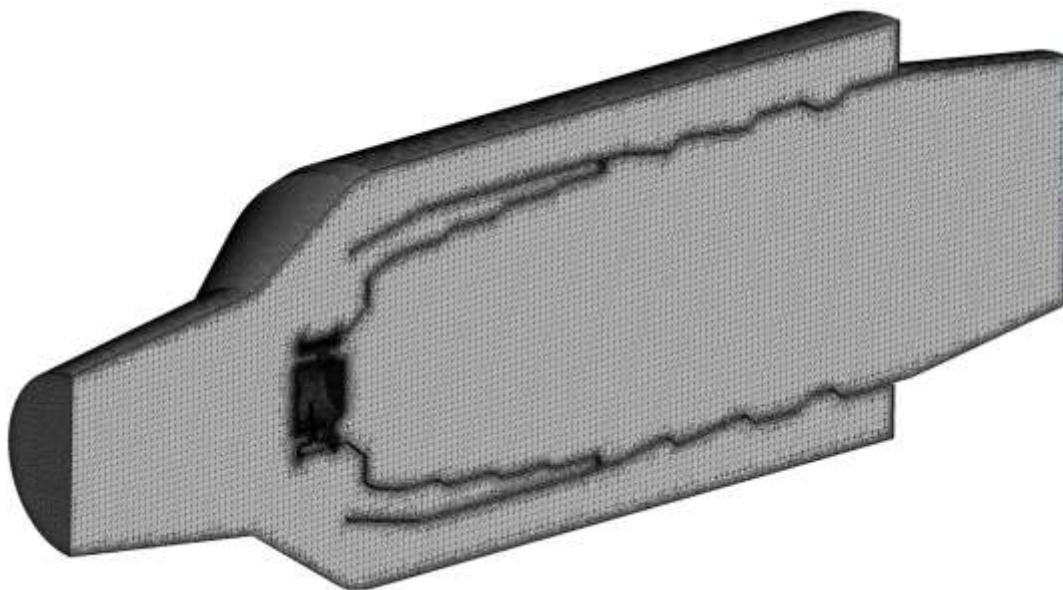


Рисунок 6.14 – Расчетная сеточная модель модельной камеры сгорания.
3D вид в разрезе

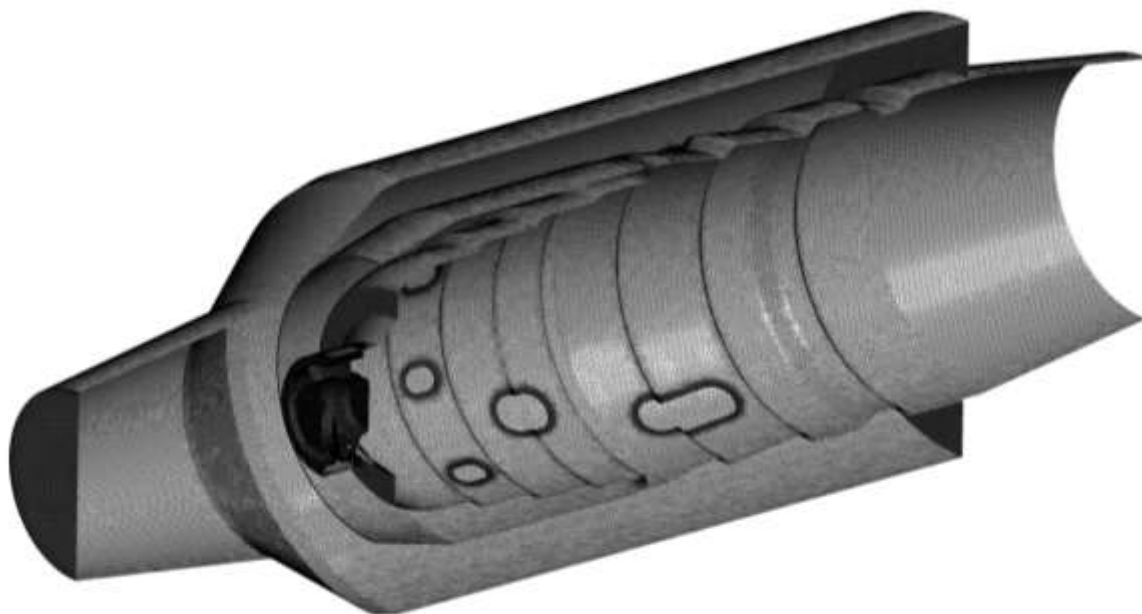


Рисунок 6.15 – Расчетная сеточная модель модельной камеры сгорания.
3D вид в разрезе

Параметры расчетной сетки для модельной камеры сгорания приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Параметры расчетной сетки

	Количество узлов	Количество ячеек	Характерный размер элемента (м)	Размер элемента в пристеночной области (м)
Камера сгорания	5 235 144	17 897 575	0.005	2e-05 – 2e-4

При разработке расчетной модели для описания газодинамических процессов в камере использовались тетраэдральные элементы с призматическими слоями вблизи стенок в виду высокой сложности геометрии. Данный вид элементов позволяет наиболее корректно учесть влияние пограничного слоя.

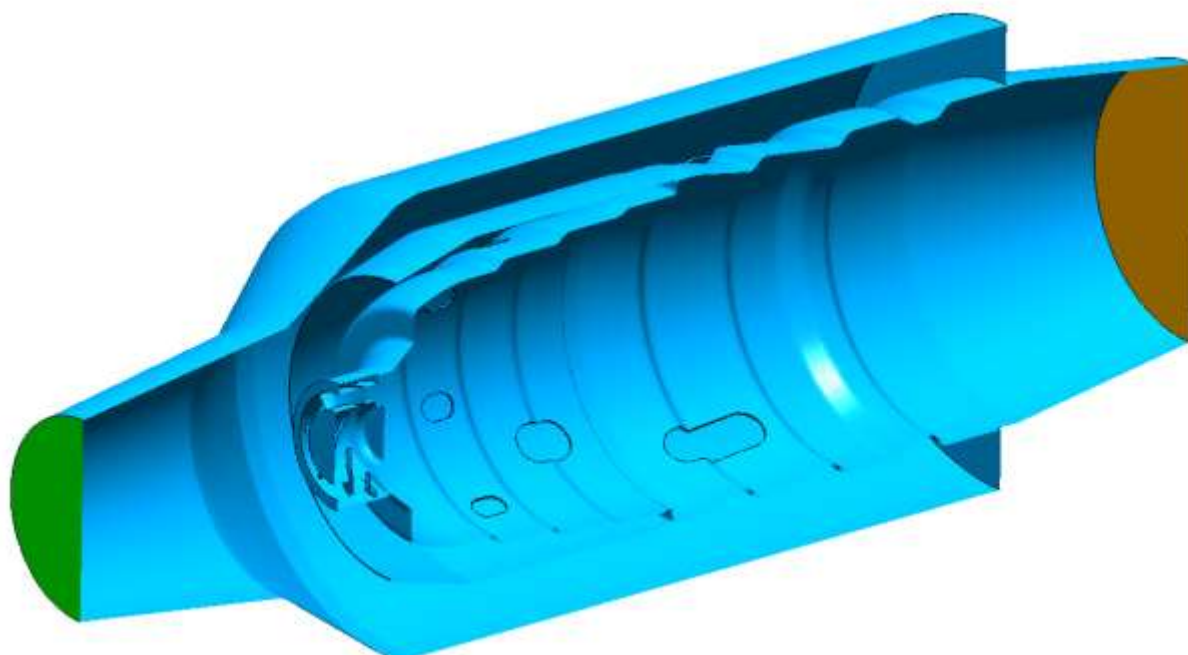


Рисунок 6.16 – Пространственная модель одногорелочной модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя

Постановка граничных условий. Для расчета процесса горения в камере сгорания использовались следующие граничные условия, приведенные на

рисунке 6.16. На границе входа в расчетную область (зеленый цвет) задавался массовый расход воздуха соответствующий $G_B = 0.583$ кг/с и температура 150 С. На выходе из камеры сгорания ставилось условие по статическому давлению 1 атм. На границах указанных синим цветом ставилось условие прилипания потока и условие адиабатичности. В качестве окислителя использовалась смесь компонентов газов кислород $O_2 - 23.3\%$, азот $N_2 - 76.7\%$.

В рамках проведенного численного моделирования на супервычислительном комплексе СПбПУ рассматривалось химическое взаимодействие окислителя с жидкостным топливом.

В качестве рабочей жидкости рассматривался керосин с приближенной формулой $NC_{10}H_{22}$.

В результате температурного нагрева топливо из жидкого состояния переходит в газообразное.

Физико-механические свойства керосина в жидком и газообразном состояниях приведены в таблице 6.3.

Испарение инжектированной топливно-капельной среды осуществляется посредством расчёта давления насыщенного пара топлива при заданной температуре. Указанный расчет осуществляется посредством уравнения Антуана (6.15) для специальным образом созданной однородной бинарной смеси: жидкое топливо – газовая фаза топлива. Используемые для авиационного топлива параметры уравнения Антуана приведены в таблице 6.4.

Для реализации численного моделирования распыла топлива использовался переход к Лагранжевой дискретной фазе с учетом уравнений (6.12) – (6.14). При этом первичный распыл топлива на непосредственном выходе из форсунки не моделировался. Последнее связано с тем, что при верификации экспериментом при воздействии электрических полей на топливо в расчетных моделях электрогидродинамических процессов распыла топлива и горения топливо-воздушной смеси трудно учесть все многообразий электрофизических и электрохимических происходящих процессов. Вместо этого внутри модельной камеры сгорания на расстоянии 30 мм от сопла форсунки (на этом расстоянии

измерялись в эксперименте па, раметры распыла [41,6,8,154]) задавалось распределение капель топлива с заданными параметрами расхода и диаметров капель. Расход топлива принимался согласно эксперименту равным 5,79 г/с.

Таблица. 6.3 – Физико-механические свойства топлива (керосина) в жидком и газообразном состояниях

	Газообразное состояние	Жидкое состояние
Плотность, кг/м ³	Идеальный газ с молярной массой 142,27 кг/кмоль	780
Вязкость, Па·с	5.28e-6	0.0015
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	-	0.023
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0.009	0.14

Таблица 6.4 – Параметры уравнения Антуана

A	23,3
B	5600 К
C	25 К
Коэффициент давления	1 Па

Схематично зона распыла показана векторами на рисунке 6.17.

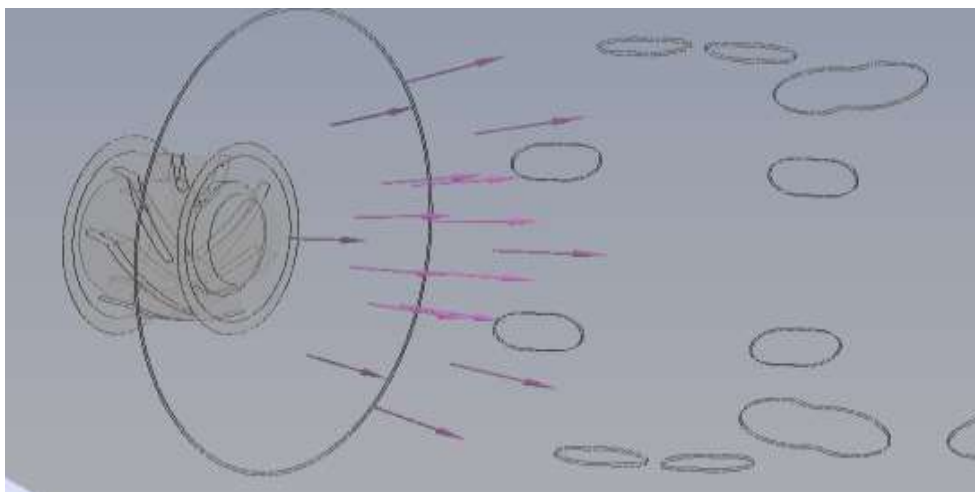
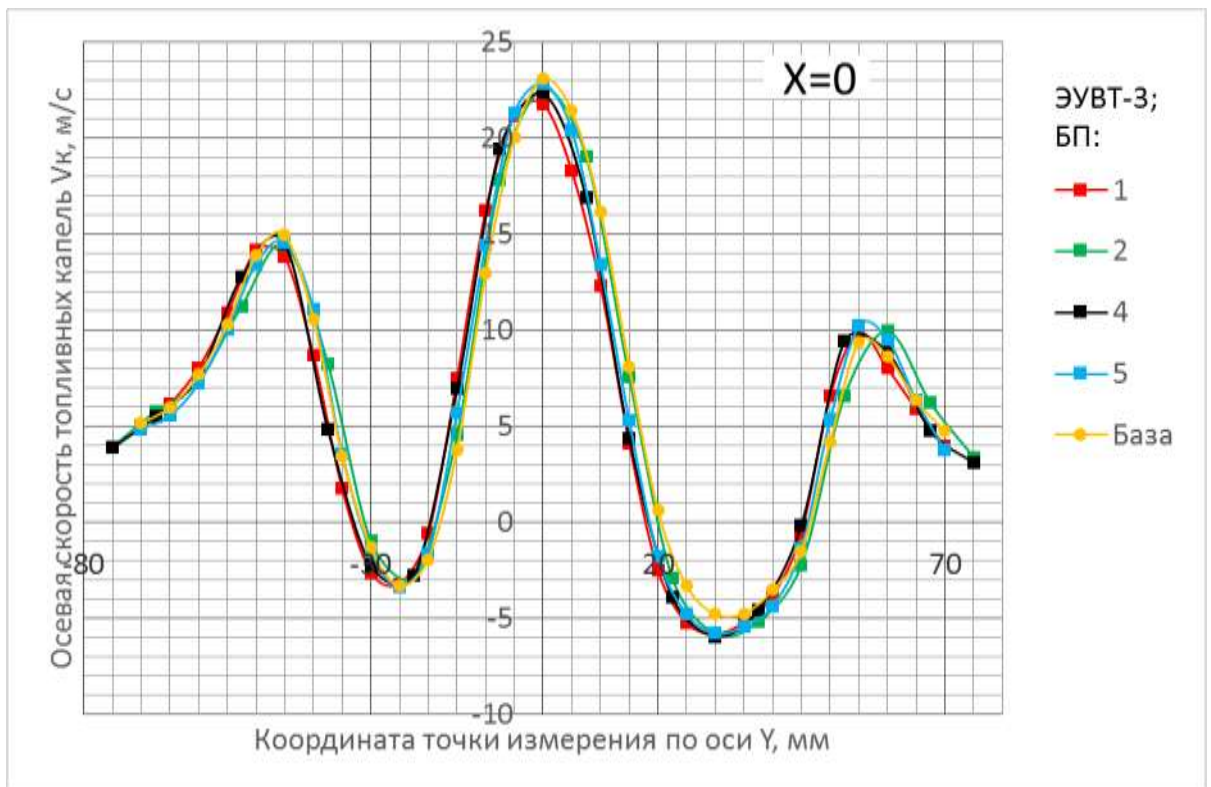


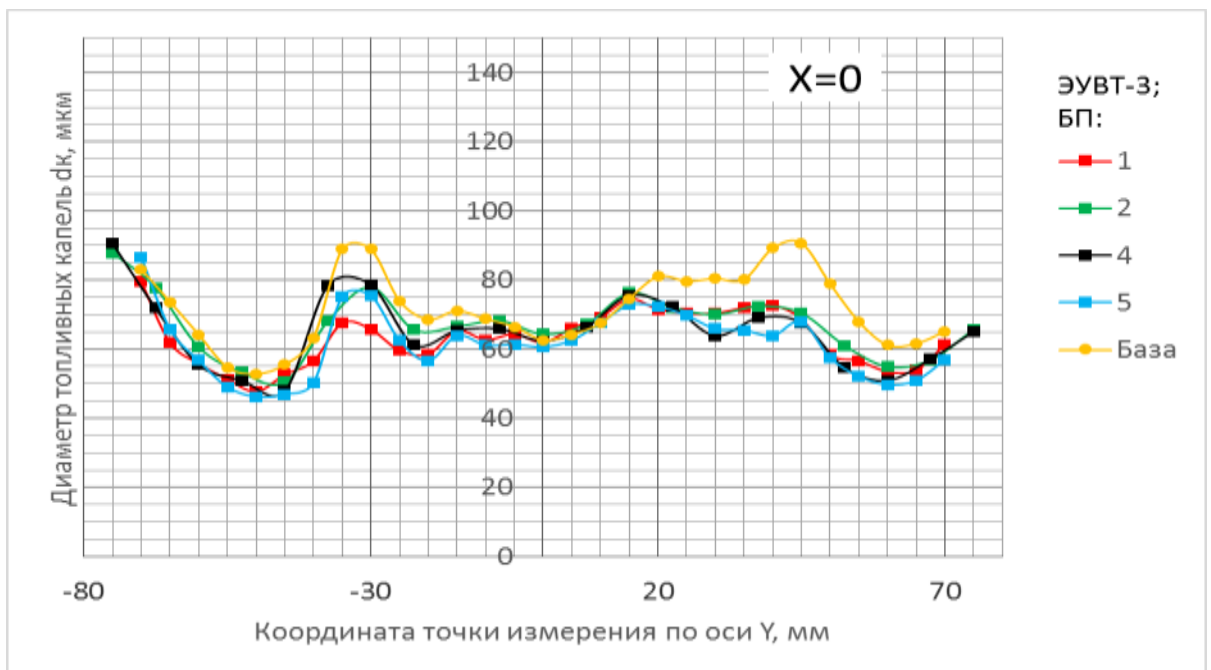
Рисунок 6.17 – Зона расположения точек распыла топлива в расчетной модели процессов горения в модельной камере сгорания

При сравнительном сопоставлении результатов численных расчетов с полученными впервые экспериментальными данными по влиянию электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания углы факела распыла, размеры капель топлива и скорости их движения принимались на основе также впервые полученных на установке УПФ – 372 СГАУ (см 5 главу) экспериментальных данных по соответствующим параметрам распыла [41,6,8,154]. При этом в расчетную модель вводились соответствующие экспериментально снятые для центробежной форсунки углы факела распыла капель керосина, скорости и диаметры капель керосина. Эти данные учитывались вначале без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ (база для сравнения), а потом при прочих одинаковых режимах работы центробежной форсунки вводились в расчетную модель соответствующие экспериментальные данные с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ, включенном в цепь питания центробежной форсунки.

На рисунках 6.18 – 6.22 приведены результаты экспериментальных исследований [41,6,8,154] влияния электрических полей на углы факела распыла капель керосина, скорости и диаметры капель центробежной форсункой с электрическим полем и без него в цепи питания центробежной форсунки.

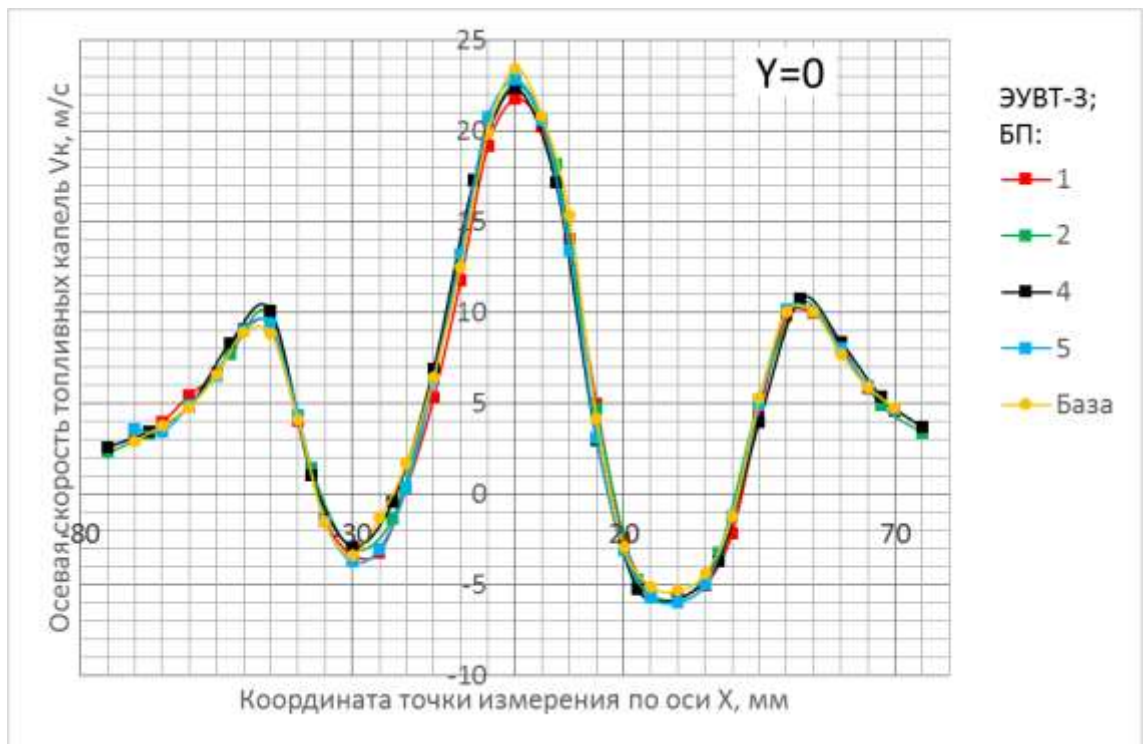


а)

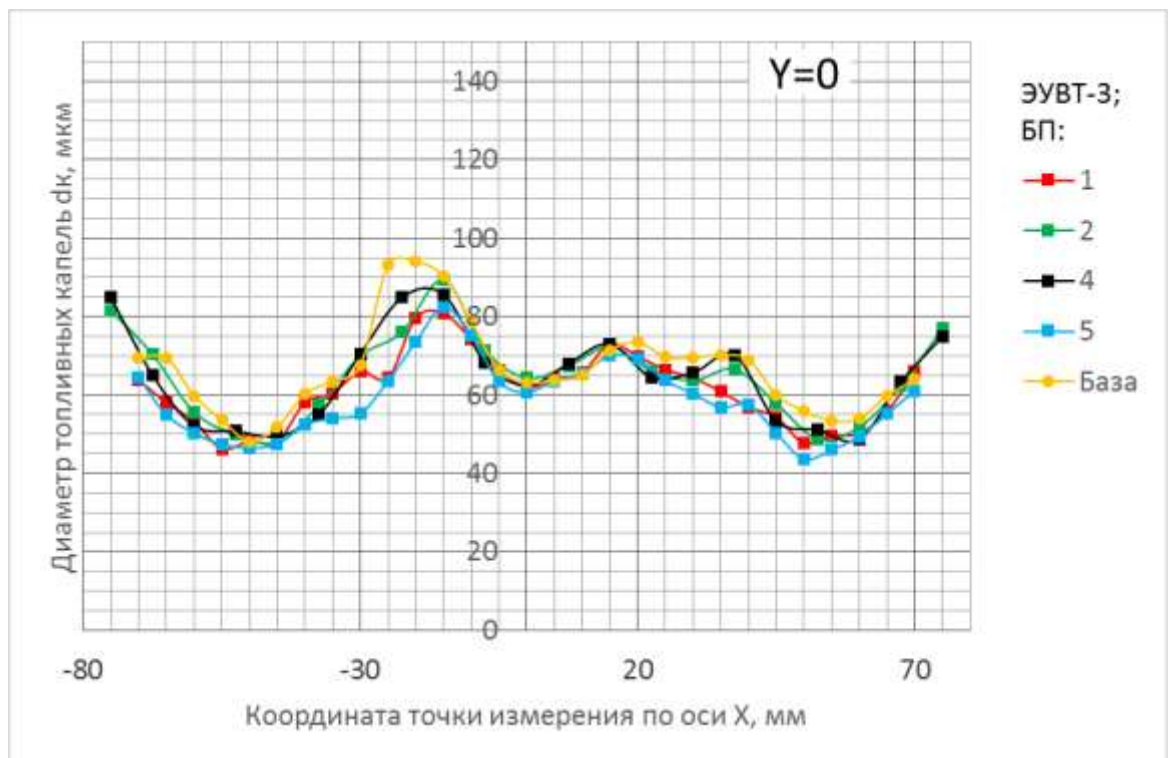


б)

Рисунок 6.18 – Экспериментально снятые эпюры осевой скорости (а) и диаметров (б) каплей керосина центробежной форсунки, используемой при огневых испытаниях модельной камеры сгорания, для комплектов электрокаплеструйных форсуночных модулей с базовым ЭУВТ в цепи питания и различными БП ($X = 0$)



а)



б)

Рисунок 6.19 – Экспериментально снятые эпюры осевой скорости (а) и диаметров (б) капель керосина центробежной форсунки, используемой при огневых испытаниях модельной камеры сгорания, для комплектов электрокаплеструйных форсуночных модулей с базовым ЭУВТ и различными БП ($Y = 0$)

На рисунках 6.18 – 6.19 даны X- и Y-эпюры V_K и d_K для форсуночного модуля базовым ЭУВТ (ЭУВТ-3), включенным в цепь питания центробежной форсунки непосредственно перед входом топлива в форсунку, для разных вариантов блоков питания – БП; форсуночного модуля .

Экспериментальное определение характеристики форсуночного модуля по углу топливного факела с центробежной форсункой, используемой на огневом стенде СГАУ, выполнялось по методике, описанной в [318] .

В результате проведенных экспериментальных исследований получены многочисленные изображения влияния характера электрического напряжения на электродах ЭУВТ на угол раскрытия топливного факела для центробежной топливной форсунки с базовым ЭУВТ -3 и различными комбинациями БП. Данные изображения далее обрабатывались. Пример обработанного изображения ($\Delta \bar{p}_B = 3 \%$, $\Delta p_T = 1,28$ ат) представлен на рисунке 6.20. Освещение факела производилось «лазерным ножом».

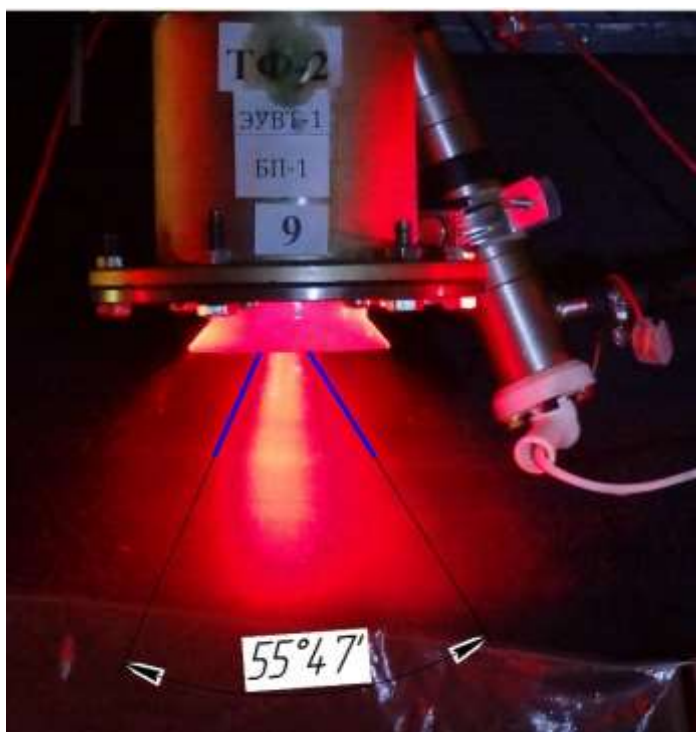


Рисунок 6.20 – Угол топливного факела центробежной форсунки, используемой на огневом стенде СГАУ: ($\Delta \bar{p}_B = 3 \%$, $\Delta p_T = 1,28$ ат)

На рисунке 6.20 виден справа ЭУВТ, включенный в цепь питания центробежной форсунки в непосредственной близости перед входом топлива в форсунку.

Сводные результаты снятия характеристик по углу топливного факела для ЭУВТ-3 с различными БП представлены на рисунках 6.21 и 6.22.

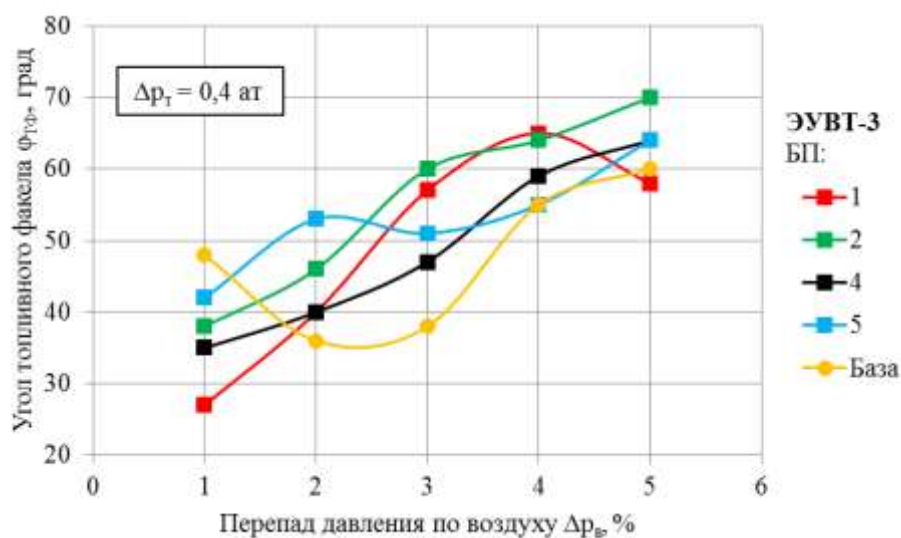


Рисунок 6.21 – Сводные результаты характеристик по влиянию электрических полей на угол распыла топливного факела для центробежной форсунки с базовым ЭУВТ-3 и различными БП для перепада давления по топливу $\Delta p_T = 0,4$ ат

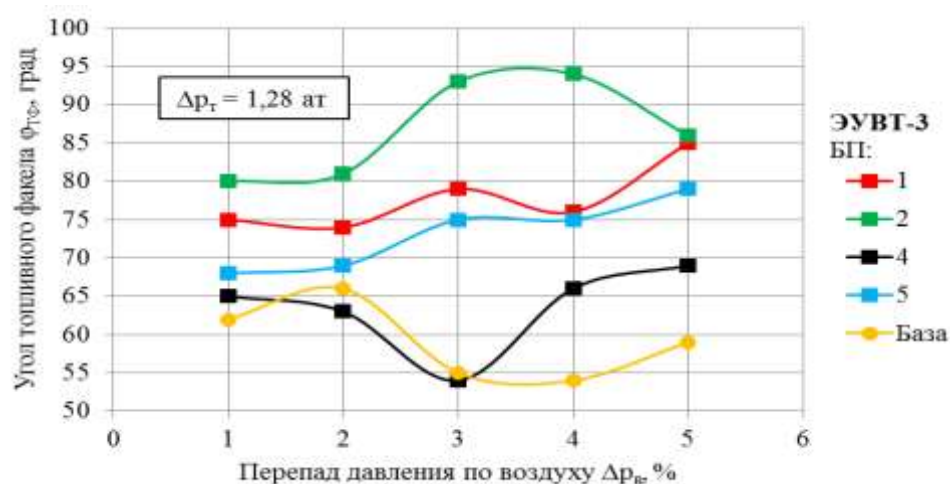


Рисунок 6.22 – Сводные результаты характеристик по влиянию электрических полей на угол распыла топливного факела для центробежной форсунки с базовым ЭУВТ-3 и различными БП для перепада давления по топливу $\Delta p_T = 1,28$ ат

Из анализа рисунков 6.21 – 6.22 видно, что с увеличением перепада давления по воздуху $\Delta \bar{p}_B$, угол топливного факела $\varphi_{T\Phi}$ при наличии электрического напряжения на электродах ЭУВТ увеличивается, причём, чем больше перепад давления по топливу Δp_T , тем менее значительно это увеличение. Это объясняется тем, что потоку воздуха необходимо затратить большее количество энергии для распыливания большего количества топлива.

В целом, несмотря на сравнительно низкую точность метода определения угла топливного факела по фотографиям, можно отметить следующее:

– для исследованных режимов и для всех вариантов сборок ЭУВТ-3 + БП_i значение угла топливного факела $\varphi_{T\Phi}$ при наличии электрического напряжения на электродах ЭУВТ оказывается больше, чем для «базы» (без электрического напряжения на электродах ЭУВТ);

– при $\Delta p_T = 0,4$ ат, $\Delta \bar{p}_B = 3$ % наибольший $\varphi_{T\Phi} = 60^\circ$ у сборки ЭУВТ-3 + БП-2; у ЭУВТ-3 + БП-5 угол $\varphi_{T\Phi} = 51^\circ$;

– при $\Delta p_T = 1,28$ ат, $\Delta \bar{p}_B = 3$ % наибольший $\varphi_{T\Phi} = 93^\circ$ у сборки ЭУВТ-3 + БП-2; у ЭУВТ-3 + БП-5 угол $\varphi_{T\Phi} = 75^\circ$.

Итак, в расчетную модель процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя вводятся результаты экспериментов по сравнительному влиянию электрических полей на основные характеристики распыла топлива (см. рисунки 6.18 – 6.22). При этом в расчетной модели было введено несколько упрощений и допущений в виду отсутствия точной информации. Предполагается, что массовый расход не зависит от размера капель и одинаков по всей зоне распыла. Температура капель равна температуре топлива на входе 25°C . Также не известен точный химический состав используемого в эксперименте топлива.

Для проведения сравнительного анализа влияния электрических полей на характеристику горения топливно-воздушной смеси рассматривались две задачи. Из экспериментов известно, что наличие электрического поля влияет на характерный размер капель топлива при распыле. Соответственно для проверки

базовых положений и гипотез было рассмотрены задачи с двумя вариантами размеров капель. Первый соответствует варианту без электрического напряжения на электродах ЭУВТ, второй - с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ.

Так как химический состав используемого в эксперименте топлива не известен, то для моделирования процесса горения использовалась модель вещества из встроенной библиотеки веществ ANSYS/CFX с кинетической моделью окисления, состоящей из 127 компонент и 1127 химических уравнений [320].

Также все стенки модельной камеры сгорания считаются теплоизолированными, т.е. передача тепла в металлических элементах конструкции в расчетной модели не учитывается.

6.1.3 Верификация экспериментом численных моделей расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическим полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

6.1.3.1 Результаты численных расчетов процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

В результате выполнения численных расчетов на супер вычислительных комплексах СПбПУ впервые промоделировано (на примере модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя) влияние электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

Получены картины распределений скоростей потоков и температуры внутри модельной камеры сгорания как без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ, так и с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ.

Картины распределения скоростей потоков в продольном сечении представлены на рисунке 6.23. Распределение температуры внутри камеры сгорания приведено на рисунке 6.24.

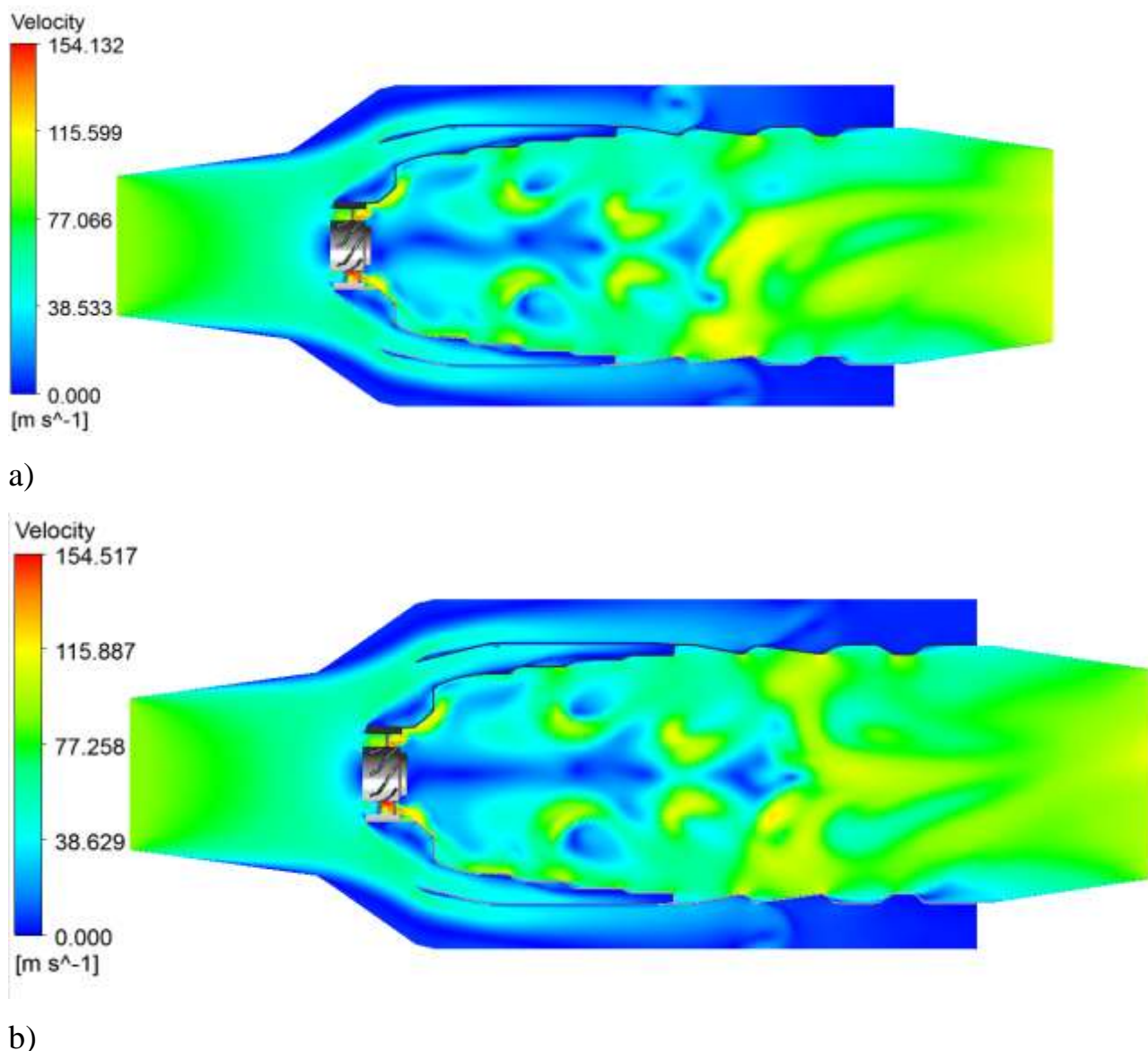
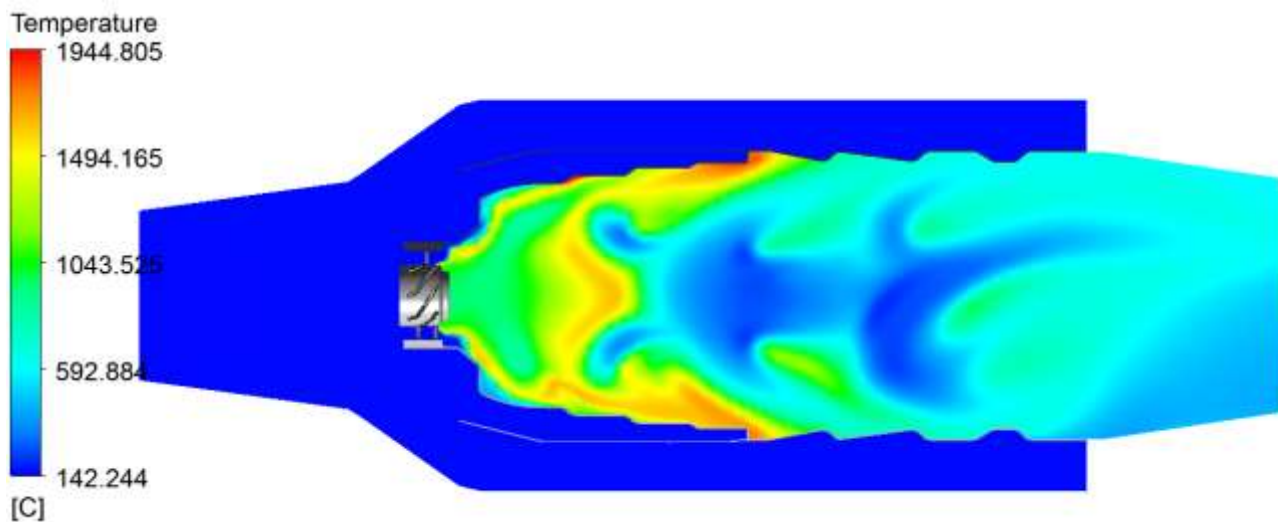
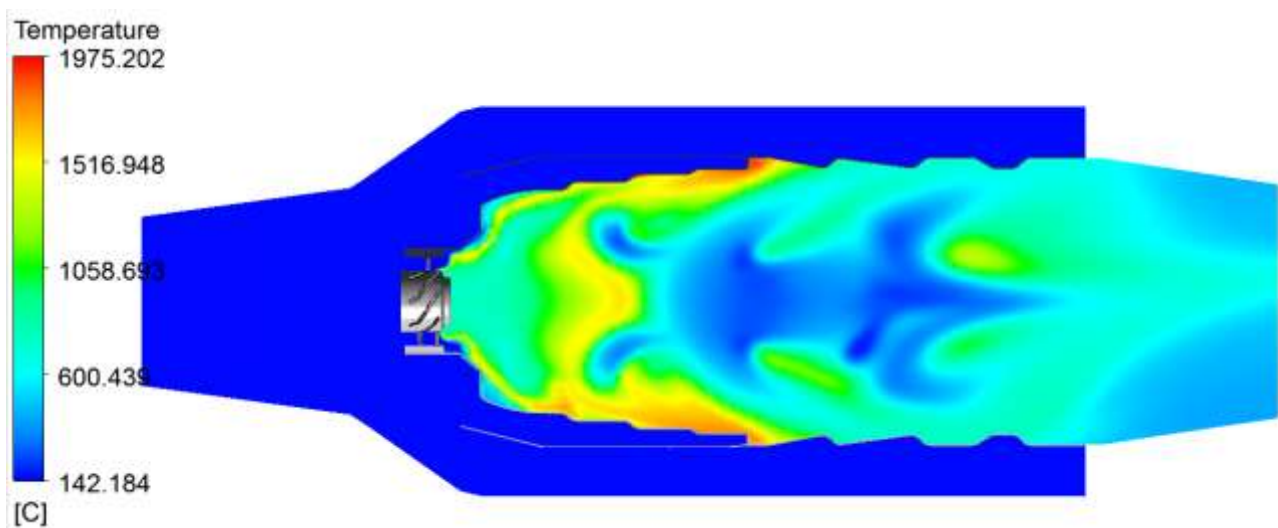


Рисунок 6.23 – Поле скоростей потоков в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с включением ЭУВТ в цепь питания центробежной форсунки: а) без электрического напряжения на электродах ЭУВТ, б) с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ



a)



b)

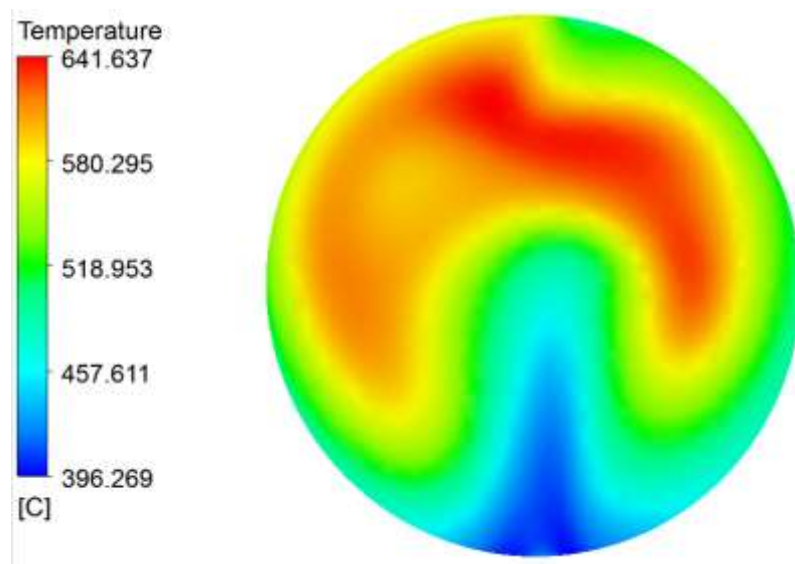
Рисунок 6.24 – Поле температур в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с включением ЭУВТ в цепь питания центробежной форсунки:

- а) без электрического напряжения на электродах ЭУВТ, б) с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ

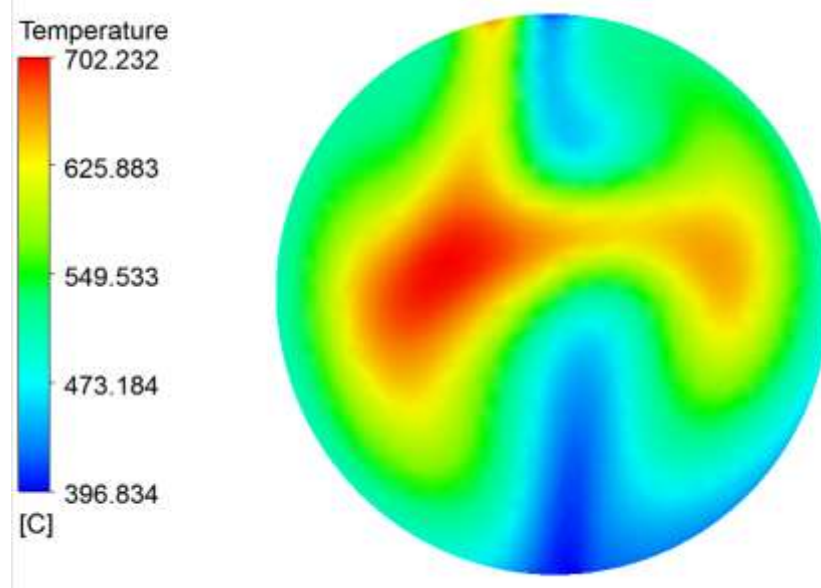
Из результатов видно, что в случае использования ЭУВТ температура горения становится больше примерно на 30 градусов.

Для более качественного сравнения рассмотрим температуру на границе выхода из смесителя.

Поля температур на выходе из смесителя приведены на рисунке 6.25.



a)



b)

Рисунок 6.25 – Поле температур газа на выходе из камеры сгорания газотурбинного авиадвигателя с включением ЭУВТ в цепь питания центробежной форсунки:

- а) без электрического напряжения на электродах ЭУВТ, б) с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ

Количественные данные по результатам численного расчета представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Данные измерения температуры газа на выходе из модельной камеры сгорания авиадвигателя при включении ЭУВТ в цепь питания центробежной форсунки

	T_{\max}, C	T_{cp}
Без электрического напряжения на электродах ЭУВТ	640	545
С электрическим напряжением на электродах ЭУВТ	702	553

Из результатов таблицы 6.5 видно, что при использовании ЭУВТ с электрическим напряжением на его электродах уменьшение размера капель приводит к увеличению максимальной температуры на выходе из камеры сгорания. В данном расчете прирост температуры составил около 10 %. Также наблюдается и прирост средней температуры примерно на 1,5%.

6.1.3.2 Результаты огневых экспериментальных исследований процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

Для верификации экспериментом результатов численного моделирования процессов горения керосино-воздушной смеси в камере сгорания на огневом стенде СГАУ проведены огневые испытания модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в

цепи питания центробежной топливной форсунки. Их результаты опубликованы автором в работах [3, 7-9, 25, 74, 156, 159, 162, 319].

Методика определения характеристики температуры газа на выходе из газосборника модельной камеры сгорания СГАУ газотурбинного авиационного двигателя. Эксперименты по определению характеристики температуры газа на выходе из газосборника камеры сгорания выполнялись путём непосредственного измерения температуры газа (t_G^* , °С), перемещаемой одноточечной хромель-алюмелевой (ХА) термопарой ТП-К 0321-И-3-320/2000 (диапазон рабочих температур 0...1100 °С) в плоскости поперечного сечения потока (плоскость YOZ) на расстоянии 20 мм от среза газосборника жаровой трубы модельной КС.

Газосборник представляет собой конической формы сужающийся участок с выходным диаметром 133 мм. На выходе из корпуса модельной КС установлена проставка квадратного сечения с вертикальными боковыми окнами, в которые устанавливается плата с втулками. Втулки выполнены с отверстиями для установки термопары (или пробоотборника), количество втулок – 7 шт., они располагаются в плоскости YOZ вдоль вертикальной оси Z. Центральная по высоте втулка совпадает с осью жаровой трубы, другие три расположены выше с шагом 20 мм по вертикальной оси Z, остальные три – ниже с тем же шагом. На семи горизонтальных прямолинейных отрезках, параллельных оси Y, замер температуры производится в 15 точках с шагом 10 мм вдоль горизонтальной оси Y. Восьмая точка замера совпадает с осью жаровой трубы, 7 точек располагаются до и 7 точек – после вертикальной плоскости меридионального сечения жаровой трубы, крайние точки (1 и 15) отстоят от этой плоскости на –70 и +70 мм соответственно. Таким образом, в сумме имеем $n=7 \times 15=105$ точек – мест измерения температуры газа в сечении YOZ. Значения температуры газа регистрируются с электронного табло микропроцессорного измерителя ОВЕН 2ТРМ0 (основная приведенная погрешность – не более $\pm 0,25\%$).

Оператор последовательно перемещает предварительно позиционированную термопару вдоль оси Y, а регистратор фиксирует и

записывает в протокол значения температуры $t_{г}^*$, °С с электронного табло в момент стабилизации показаний прибора.

Результаты при огневых испытаниях экспериментальных образцов электрокаплеструйных форсуночных модулей на модельной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя. Проведены экспериментальные исследования влияния параметров электрического поля (характера напряжения на электродах ЭУВТ, его амплитуды и частоты), конструктивных параметров ЭУВТ на распределение температуры газа на выходе КС при сгорании керосино-воздушной смеси. При этом варьировались форсуночные модули, состоящие из собственно центробежной топливной форсунки НПО «Салют» и различных конструктивных исполнений ЭУВТ с организацией электрических полей от различных электрических блоков питания (БП). Условно обозначены они соответствующими цифрами.

Ниже в качестве примера [156] представлены результаты экспериментального измерения температур в различных точках газового потока на выходе из газосборника модельной камеры сгорания и поля температур для режима работы камеры сгорания без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ и с подачей электрического напряжения на электроды базового ЭУВТ-3 от БП-5 при следующих режимных параметрах работы модельной камеры сгорания:

- $t_{к}^* = +150$ °С – температура воздуха на входе в диффузор КС;
- $\Delta P_{к} = 3750$ Па – устанавливаемый динамический напор (по дифманометру);
- $\lambda_{к} = 0,25$ – приведённая скорость воздуха на входе в диффузор КС;
- $G_{в} = 582$ г/с – расход воздуха через КС;
- $G_{т} = 5,79$ г/с – расход топлива через форсунку;
- $\alpha_{к} = 6,8$ – коэффициент избытка воздуха (при $L_0 = 14,78$).

Результаты экспериментов представляются в виде таблиц 6.6 – 6.12. Например, в первом столбце таблиц 6.6 – 6.7 указаны значения координат вдоль

вертикальной оси Z, в первой графе – значения координат вдоль горизонтальной оси Y, в мм. Начало координат – левая нижняя точка измерений, вид на таблицы - это вид на поле t_{Γ}^* навстречу потоку. Поля температур (рисунок 6.26) построены по соответствующим точкам таблиц 6.6 – 6.7.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований полей температур продуктов горения на выходе из газосборника для комплекта форсуночного модуля с ЭУВТ-3 и различных БП при подсоединении выхода керосина из ЭУВТ ко входу центробежной топливной форсунки резиновыми шлангами (см. также рисунки 6.26 – 6.30).

Величины неравномерности температурного поля в таблице 2.6 вычисляются по следующим формулам.

Неравномерность (среднеквадратичное отклонение):

$$\Delta \bar{T} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{T_{\Gamma i}^* - \bar{T}_{\Gamma}^*}{\bar{T}_{\Gamma}^*} \right)^2} \cdot 100 \%,$$

где $\bar{T}_{\Gamma}^* = \frac{1}{n} \sum T_{\Gamma i}^*$ – среднее значение температуры газа для всего поля.

Коэффициент неравномерности температурного поля:

$$\theta = \frac{\bar{T}_{\Gamma \text{ MAX}}^* - T_K^*}{T_{\Gamma}^* - T_K^*},$$

$$\bar{\Delta T} = \frac{\Delta T}{T_{\Gamma}},$$

где $\Delta T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (T_n - T_{\Gamma})^2}$; N – количество точек измерения температуры газа на выходе газосборника камеры сгорания; $N = 15 \times 7 = 105$.

$$\Theta_{\text{max}} = \frac{t_{\text{max}} - t_{\bar{n}\delta}}{t_{\bar{n}\delta} - t_{\bar{e}}} - \text{неравномерность распределения температур газа на}$$

выходе газосборника камеры сгорания; t_{max} , t_{cp} – соответственно максимальная и средняя температура газа на выходе газосборника камеры сгорания;

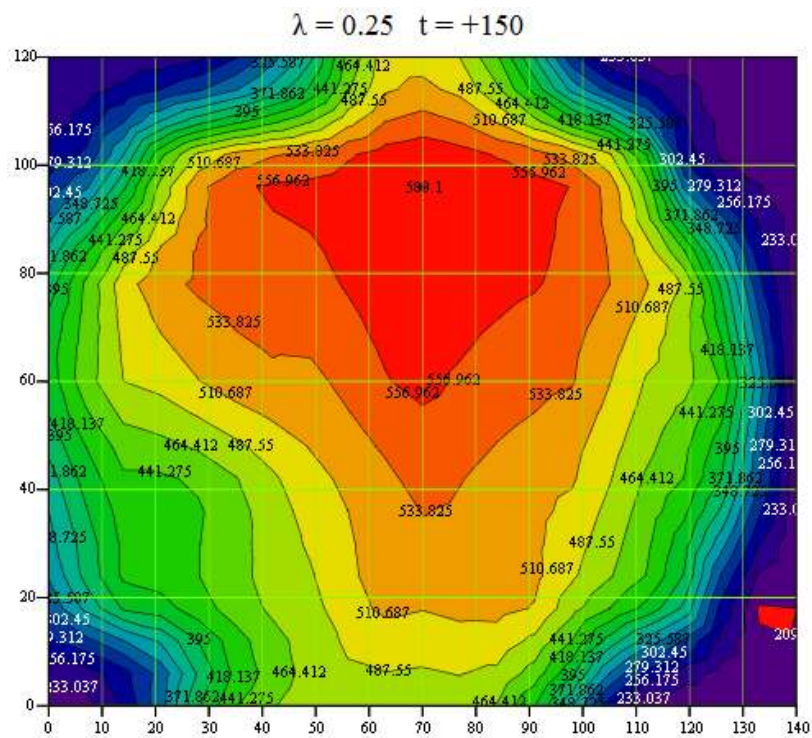
θ_{adv} – неравномерность распределения температур газа на выходе газосборника камеры сгорания, подсчитанная по методике ОАО «Авиадвигатель».

Таблица 6.6 – Значения температуры газа $t_{г}^*$, °С на выходе из камеры сгорания без электрического напряжения на электродах ЭУВТ 3

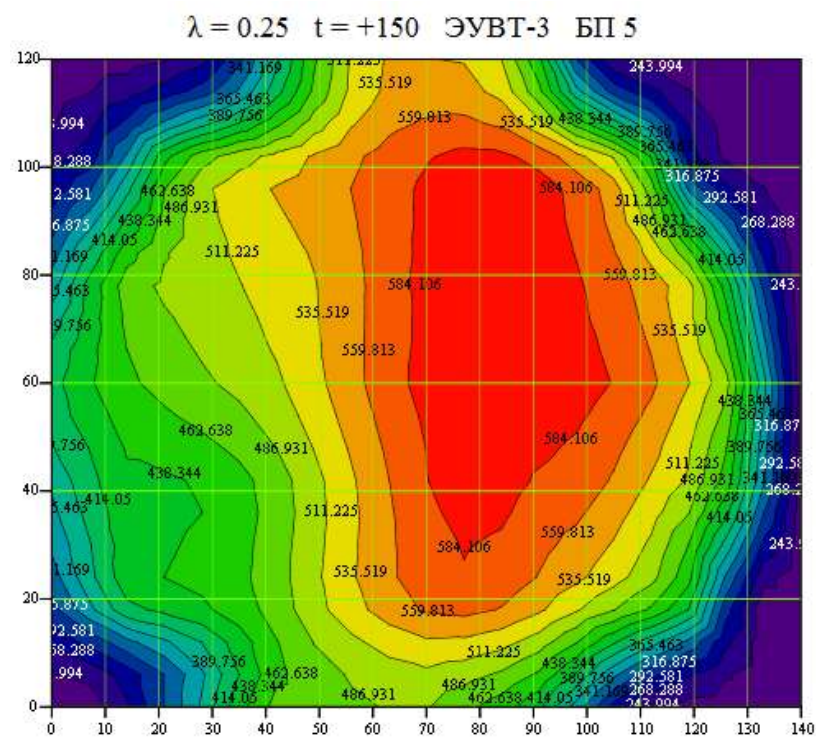
#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	238	238.5	240.1	257.1	307	375.4	485.2	501.1	471.4	382.3	267.1	227.6	227.7	225.5	222.3
100	269.1	311.6	447.4	532.3	554.7	558.5	572.9	580.1	571.3	561.8	543.8	477.3	258.8	223.9	223.4
80	375.4	477.8	524.7	542.2	546.9	551	567.3	575.6	566.5	561.3	548.4	520.7	473.8	320.7	223.2
60	405.4	479.3	493.1	514	529.7	527.7	550.2	564.4	549.1	541.3	531.7	490.5	469.3	406.9	220.2
40	355.6	428.3	431.9	442.8	473.7	504.2	518.5	542.2	528.5	519.1	507.1	464.8	432.8	352.3	215.4
20	315.2	408.1	421.4	444.4	469.1	482.3	517.9	515.7	522.4	518.6	473.1	440.9	375.2	221.6	209.9
0	215.8	238.8	306.6	410.4	455.6	480.2	482.6	476.8	473.3	426.1	327.4	219.9	214.3	213.9	213.2

Таблица 6.7 – Значения температуры газа $t_{г}^*$, °С на выходе из камеры сгорания с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ 3 от БП 5

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	234.6	233.2	240.1	271.7	361.8	467.9	531.3	536.2	524.8	457.6	287.1	238	233.1	229.7	224.7
100	263.1	306.8	443.1	510.9	531.5	549	568.1	586.8	599.6	592.2	560.1	499.4	268.6	236	226.9
80	345.6	456.4	490.2	505.2	518.8	536.5	563.8	592.6	608.4	601.5	582	552.1	507.1	356.3	227
60	405.9	449.1	468.7	486.1	502.3	531.1	565.5	593.4	598.1	600.5	592.6	571.7	531	458.1	231.1
40	366.6	427.9	431.8	439.7	465.3	505.7	546.6	583.3	597.1	580.6	570.1	536.3	500.1	403.8	231.6
20	315.3	413.3	434.1	447.2	468.5	510	545.6	570.5	577.7	552.9	521.9	492	424.9	243.2	228.8
0	219.7	242.8	309.7	384.1	463.8	477.6	485.5	489	458.5	426.2	335.2	246.2	233.9	230.8	231



а)



б)

Рисунок 6.26 – Поле температуры газа на выходе из камеры сгорания без напряжения на ЭУВТ (а) и с напряжением на ЭУВТ 3, БП 5 (б)

Таблица 6.8 – Эксперименты по измерению полей температуры газа на выходе из газосборника КС ($\lambda=0,25$; $t_{вх}=150 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha=6,8$). Форсуночный модуль с ЭУВТ-3 и БП-5.

№ п/п	ЭУВТ	БП	$t_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{max}, \text{ }^\circ\text{C}$	Θ_{max}	θ_{adv}	$\overline{\Delta T}$
1 База	-	-	421,0	580,1	0,587	0,261	0,168
2	3	5	438,2	608,4	0,591	0,234	0,172

Таблица 6.9 – Значения температуры газа на выходе из камеры сгорания с электрическим напряжением на ЭУВТ-3 и БП 1/2

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	256.3	259.5	256.4	286	352.2	426.3	517.2	529.5	494.8	410.8	263.5	227.7	217.5	217.9	218
100	278.2	335.1	460.4	540.2	549.2	558.1	567.7	581.3	564.3	572.1	544.1	476.6	265.4	239	220
80	355.4	470	532.8	553.5	550.3	560.7	572.2	557.5	564.2	560.2	534.8	503.4	464.4	330.5	225
60	421.5	498.3	523.4	532.9	530.9	546.4	556	560.8	540.1	522.6	505.6	492.8	445	392.1	222.1
40	395.7	455	456.3	472	494.4	522.5	530.8	532.2	533.9	525.2	477.2	447.8	425.1	359.3	222.7
20	336.8	426.9	441.6	464.4	492.4	518.4	515.9	521.6	520.4	509	475.4	447.2	372	227.5	217.1
0	238.1	251.8	316.5	431.5	456.8	476.7	483.3	470.4	439.6	400.4	305.1	226.2	219	218.7	213.3

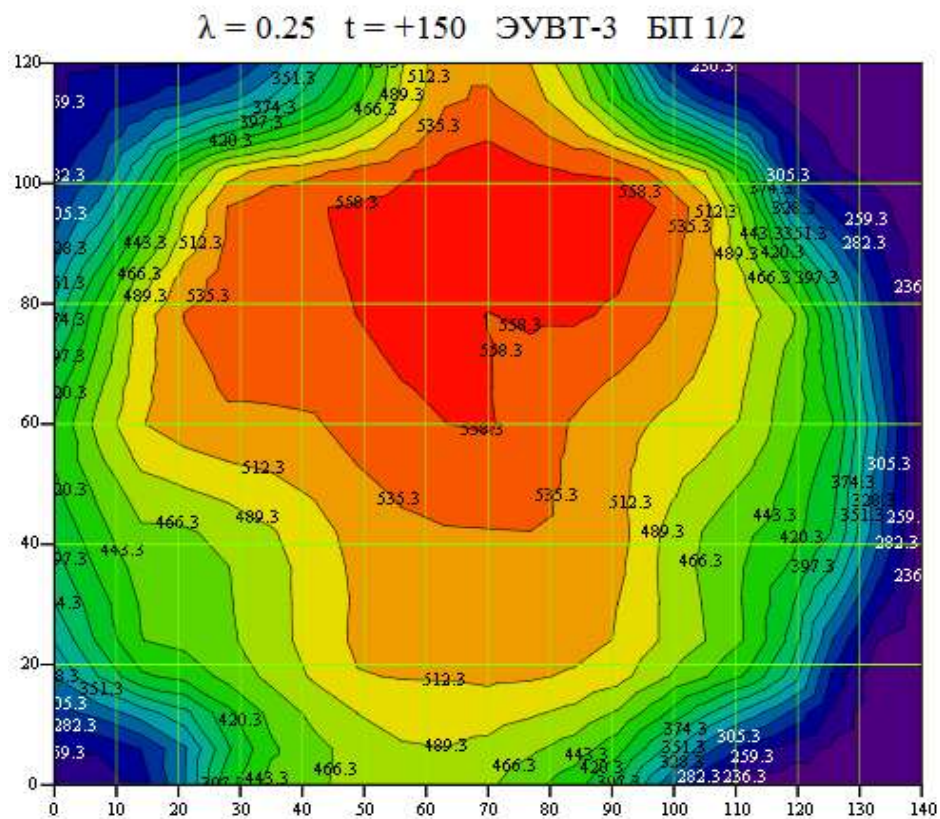


Рисунок 6.27 – Поле температуры газа на выходе из камеры сгорания с напряжением на ЭУВТ-3 и БП 1/2

Таблица 6.11 – Значения отклонений температуры газа на выходе из камеры сгорания с напряжением на ЭУВТ-3 и БП 1/2

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	7.69	8.81	6.79	11.24	14.72	13.56	6.6	5.67	4.96	7.45	-1.35	0.04	-4.48	-3.37	-1.93
100	3.38	7.54	2.91	1.48	-0.99	-0.07	-0.91	0.21	-1.23	1.83	0.06	-0.15	2.55	6.74	-1.52
80	-5.33	-1.63	1.54	2.08	0.62	1.76	0.86	-3.14	-0.41	-0.2	-2.48	-3.32	-1.98	3.06	0.81
60	3.97	3.96	6.14	3.68	0.23	3.54	1.05	-0.64	-1.64	-3.45	-4.91	0.47	-5.18	-3.64	0.86
40	11.28	6.23	5.65	6.59	4.37	3.63	2.37	-1.84	1.02	1.18	-5.9	-3.66	-1.78	1.99	3.39
20	6.85	4.61	4.79	4.5	4.97	7.48	-0.39	1.14	-0.38	-1.85	0.49	1.43	-0.85	2.66	3.43
0	10.33	5.44	3.23	5.14	0.26	-0.73	0.15	-1.34	-7.12	-6.03	-6.81	2.86	2.19	2.24	0.05

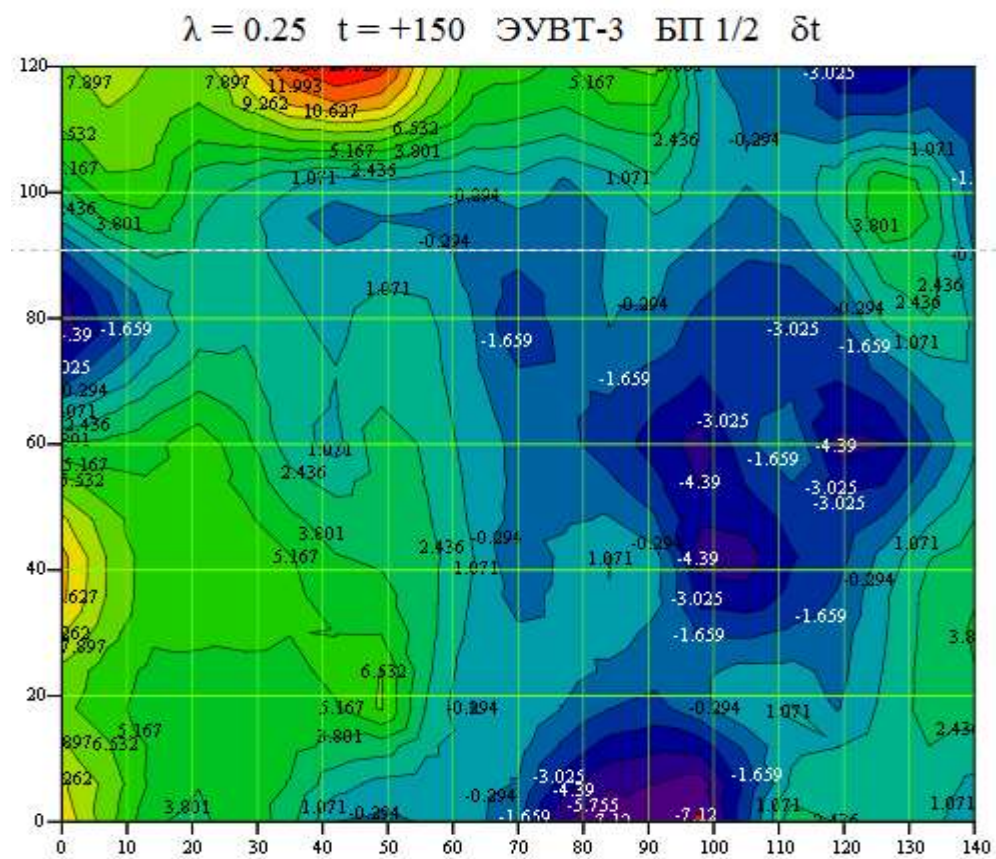


Рисунок 6.29 – Отклонения температуры газа на выходе из модельной камеры сгорания с напряжением на ЭУВТ-3 и БП /2

Таблица 6.12 – Значения отклонений температуры газа на выходе из модельной камеры сгорания с электрическим напряжением на ЭУВТ-3 и БП 2 (центробежная форсунка)

#	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
120	7.69	8.81	6.79	11.24	14.72	13.56	6.6	5.67	4.96	7.45	-1.35	0.04	-4.48	-3.37	-1.93
100	3.38	7.54	2.91	1.48	-0.99	-0.07	-0.91	0.21	-1.23	1.83	0.06	-0.15	2.55	6.74	-1.52
80	-5.33	-1.63	1.54	2.08	0.62	1.76	0.86	-3.14	-0.41	-0.2	-2.48	-3.32	-1.98	3.06	0.81
60	3.97	3.96	6.14	3.68	0.23	3.54	1.05	-0.64	-1.64	-3.45	-4.91	0.47	-5.18	-3.64	0.86
40	11.28	6.23	5.65	6.59	4.37	3.63	2.37	-1.84	1.02	1.18	-5.9	-3.66	-1.78	1.99	3.39
20	6.85	4.61	4.79	4.5	4.97	7.48	-0.39	1.14	-0.38	-1.85	0.49	1.43	-0.85	2.66	3.43
0	10.33	5.44	3.23	5.14	0.26	-0.73	0.15	-1.34	-7.12	-6.03	-6.81	2.86	2.19	2.24	0.05

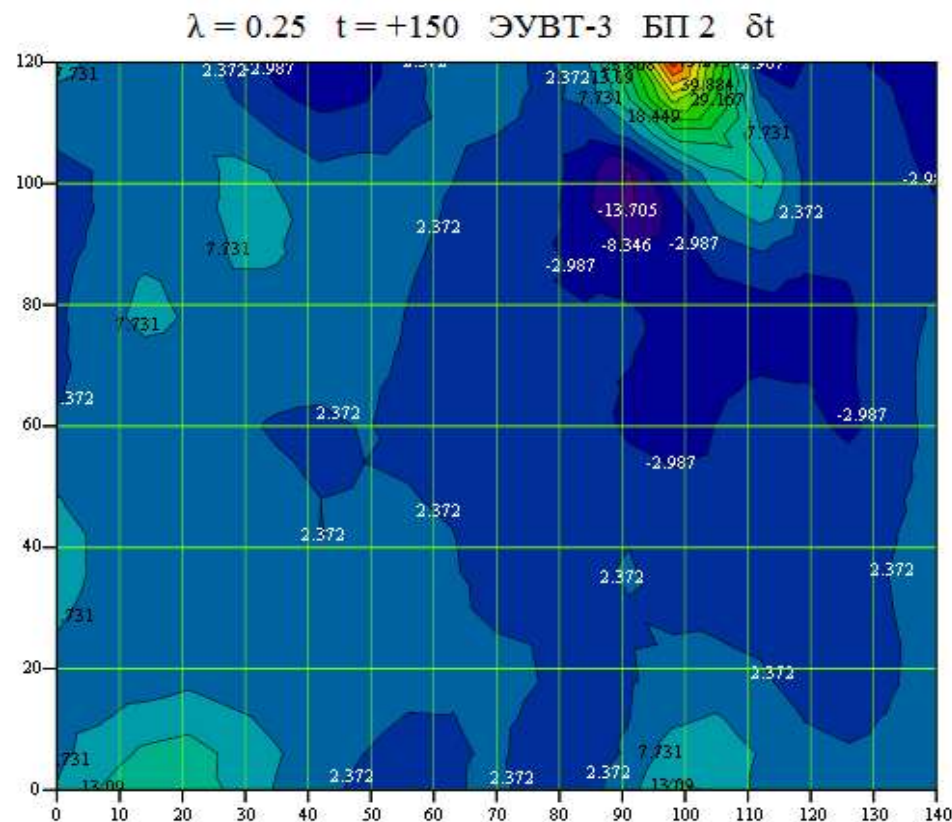


Рисунок 6.30 – Отклонения температуры газа на выходе из камеры сгорания с напряжением на ЭУВТ-3 и БП 2

Огневые испытания форсуночных модулей с центробежной топливной форсункой показали, что использование форсуночных модулей с ЭУВТ-3 и БП-5 (см.рисунки 6.26, 6.27 и таблицу 6.8):

- повышает среднюю температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы;
- повышает максимальную температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы;
- снижает неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы.

6.1.3.3 Сопоставление с экспериментальными данными результатов численного моделирования влияния электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки

Для верификации экспериментом результатов численного моделирования рассмотрим экспериментально полученные поля температур с ЭУВТ 3 и БП 5 (см.рисунки 6.26, 6.27 и таблицу 6.8).

Из сопоставления результатов видно, что как в случае численного моделирования, так и в случае эксперимента при подаче электрического напряжения на электроды ЭУВТ наблюдается повышение температуры горения на выходе из модельной камеры сгорания.

В данном эксперименте прирост максимальной температуры составил около 5%. Также наблюдается и прирост средней температуры примерно на 4%.

Из сопоставления результатов можно говорить, что хотя величины температуры в численном моделировании и эксперименте отличаются, в виду отсутствия полноты входных данных для моделирования и использованием некоторых упрощений в расчетах, общая тенденция в обоих случаях одинаковая. Результаты, полученные численно и экспериментально, показывают, что

применение воздействия электрического поля на топливо приводит к повышению температуры горения. Таким образом, подтверждаются базовые положения теоретических моделей.

6.2 Математические модели и методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя типа ПД-14. Огневые экспериментальные исследования влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения

6.2.1 Численное моделирование сопряженного теплообмена в пневматической топливной форсунке (как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля) при двухфазном течении керосино -воздушной смеси

Проведено [7] с использованием современного пакета в области гидроаэродинамики ANSYS/CFX [320-321] моделирование теплового состояния пневматической топливной форсунки (как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля) в условиях сопряженного теплообмена с подаваемым горячим воздухом и холодным жидким топливом (керосином). Для решения задачи используется прямое численное решение системы уравнений Навье-Стокса в сочетании с SST моделью турбулентности, уравнения теплопроводности и теплового излучения, а также VOF модели межфазного взаимодействия между воздухом и топливом.

Объект и задачи исследований. Математические и расчетные модели.

В качестве объекта исследования рассматривается разработанная с позиций динамического конструирования пневматическая форсунка авиационного двигателя применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14 (см параграф 5.3.4.1 настоящей работы). В силу специфики ее использования, как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля при включении ЭУВТ в цепь питания форсунки, в камере сгорания на форсунку действуют существенные

внешние тепловые нагрузки, вызванные конвекционными и диффузионными процессами теплопередачи, а также лучистым теплообменом от горящего топлива. Температура в камере сгорания достигает 2500 К, в то время как топливо на входе в форсунку имеет температуру около 300 К. Такой существенный перепад температуры приводит к неравномерному нагреву конструкции форсунки и как следствие возникновения в ней температурных деформации и напряжений.

Определим распределения температуры в элементах данной пневматической форсунки [7].

Стоит отметить, что определение реального теплового состояния форсунки на практике крайне затруднительно в виду ее малых размеров и сложных условий эксплуатации. В связи с этим наиболее актуальным представляется использование современных средств инженерного анализа на основе численного решения фундаментальных уравнений и разработанных математических моделей физико-механических процессов.

Так, для моделирования теплового состояния пневматической форсунки рассматривалось численное решение задачи сопряженного теплообмена между конструктивными элементами форсунки и двухфазной топливно-воздушной смесью.

Для моделирования решения задачи использовалась совокупность нестационарных дифференциальных уравнений вязкой жидкости Навье-Стокса [76] и тепловой энергии :

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \rho (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -grad P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F} \quad (6.30)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (6.31)$$

$$\frac{\partial c_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (c_p \rho \mathbf{V} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S \quad (6.32)$$

Здесь ρ – плотность среды, \mathbf{V} – вектор скорости, P – давление, T – температура, μ – динамический коэффициент вязкости, λ – коэффициент

теплопроводности среды, c – теплоемкость среды, F – вектор объемных сил, τ – вектор напряжений, S – объемное тепловыделение.

Уравнение (6.32) при этом записывается отдельно для жидкой среды и отдельно твердого тела. На границе раздела жидкой среды и твердого тела должно обеспечиваться непрерывность теплового потока.

Моделирование турбулентности осуществлялось путем использования SST модели турбулентности [186].

Моделирование двухфазного взаимодействия осуществлялось при помощи VOF модели многофазного взаимодействия [218].

Для решения поставленной задачи была рассмотрена геометрия распылительного устройства пневматической форсунки, приведенная на рисунке 6.31.

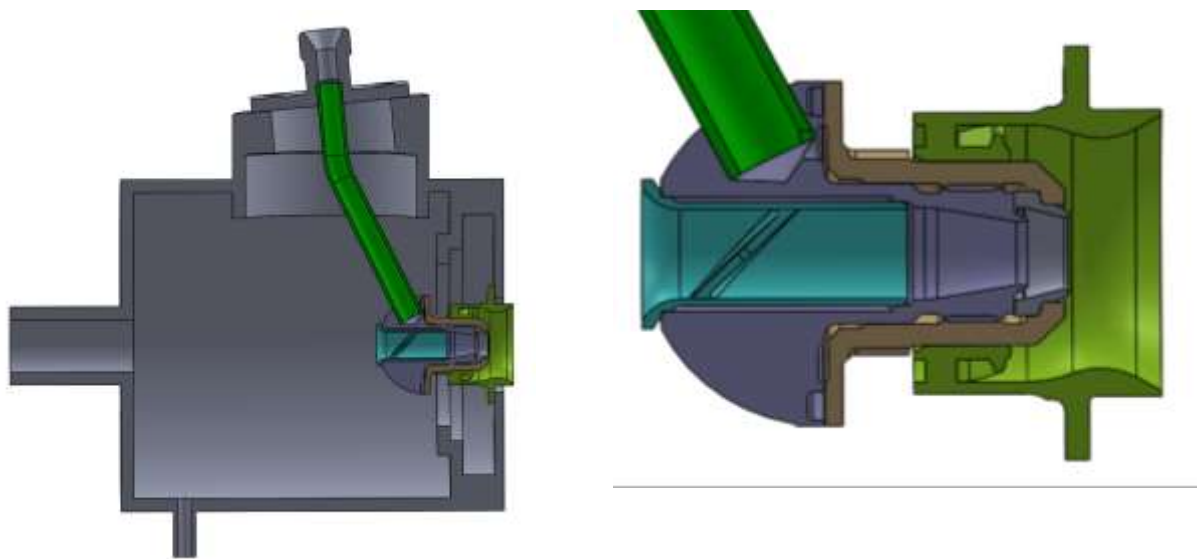


Рисунок 6.31 - Геометрическая модель распылительного устройства пневматической форсунки, как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля при включении ЭУВТ в цепь питания форсунки

Для решения уравнений механики жидкости и тепловой энергии (6.20) – (6.22) применительно к объекту исследования использовалась численное моделирование в среде пакета ANSYS/CFX [320-321]. Для этой цели для исследуемой конструкции (см. рисунок (6.31) и окружающего пространства была

построена расчетная модель на основе представления конструкции форсунки и окружения конечными объемами.

Расчетная модель, состоящая из более чем 44 млн. ячеек, приведена на рисунке 6.32.

Для решения поставленной задачи использовалось распараллеливание на 840 ядер на суперкомпьютере Санкт-Петербургского политехнического университета.

Для моделирования сопряженного теплообмена между газовой средой и твердыми стенками пневматической форсунки при построении расчетной сетки использовался одинаковый размер расчетных ячеек на границе раздела сред. Для уточненного моделирования области первичного распыла топлива в зоне сопла использовалось дополнительное сгущение сетки.

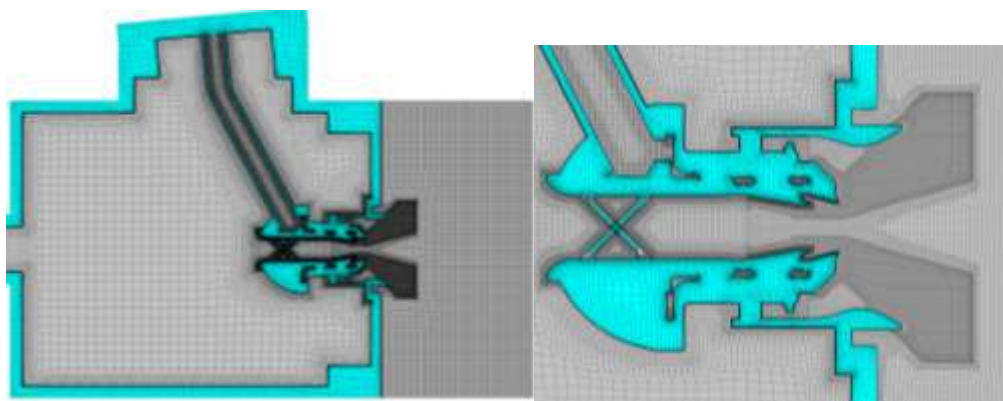


Рисунок 6.32 - Расчетная сетка для расчета газодинамического и теплового состояния пневматической форсунки как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля

Для расчета теплового состояния форсунки рассматривался режим, приближенный к реальным условиям в камере сгорания.

В рамках проведенного численного моделирования рассматривалась взаимодействие трех сред воздуха, топлива и твердого тела. В качестве топлива рассматривался керосин.

Корпусные твердотельные элементы пневматической форсунки выполнены из стали. Физико-механические свойства сред приведены в таблице 6.13.

Таблица 6.13 - Физико-механические свойства сред

	Воздух	Керосин
Плотность, кг/м ³	1.2	780
Вязкость, Па·с	1.83e-5	0.0015
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	-	0.023
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0.026	0.11
Теплоемкость, Дж/кг·К	1004	2.1

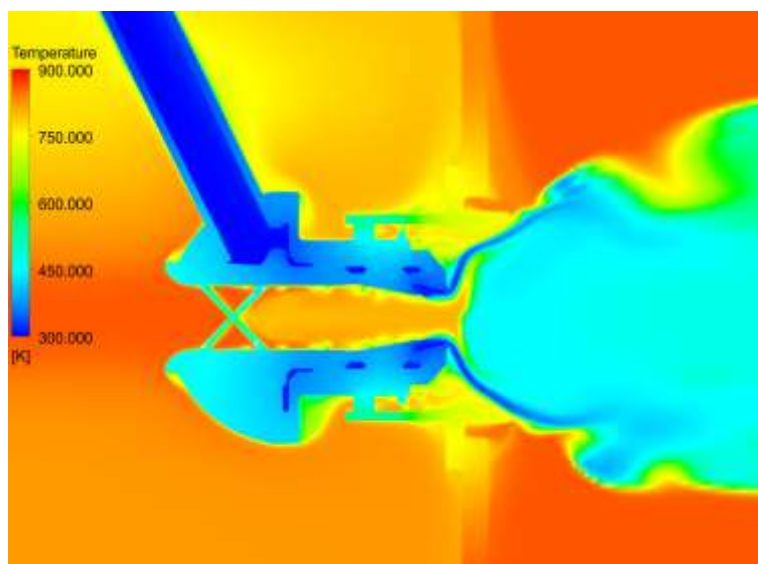
Для расчета теплового состояния пневматической форсунки использовались теплопроводящие свойства стали с коэффициентом теплопроводности $k = 60.5$ Вт/м·К и теплоемкостью 434 Дж/кг·К

В качестве граничных условий на входе в воздушный канал пневматической форсунки задавался массовый расход воздуха $m_a = 0.1$ кг/с и температура $T_a = 890$ К. В топливный канал задан расход топлива $m_f = 0.023$ кг/с и температура $T_f = 300$ К. Также учтено поступление воздуха в жаровую трубу со стороны наружных перфорированных стенок. При моделировании рассматривается только начальный участок жаровой трубы, составляющий 1/5 часть общей длины. Расход поступающего воздуха на данном участке принят равным 0.18 кг/с. Вектор скорости направлен по нормали к стенкам жаровой трубы. Для моделирования температурного воздействия на форсунку со стороны горячей топливно-воздушной смеси, на выходе из расчетной области, задана температура горения топлива в 2200 К. Для учета нагрева форсунки по средством лучистого теплообмена использовалась модель излучения на основе закона Стефана Больцмана [7].

Для моделирования процесса распространения излучения в расчетной области использовался алгоритм Discrete Transfer, в котором непрерывный источник излучения, заменяется на конечное количество испускающих поверхностей, а направления излучения моделируются конечным числом трассирующих лучей.

Решение задачи искалось для квазиустановившегося режима, при этом детального моделирования распыла топлива на капли не проводилось.

Результаты численного моделирования. В результате моделирования вышеописанной задачи было получено распределение температуры в распыливающем устройстве пневматической форсунки и в окружающей ее области (рисунок 6.33).



Ъ

Рисунок 6.33 - Распределение температуры в пневматической форсунке, как элементе электрокаплеструйного форсуночного модуля

Результаты численного моделирования показывают, что в наружные элементы пневматической форсунки при рассмотренном варианте теплового воздействия нагревается примерно до 450 К при температуре окружающего воздуха порядка 860 К, при этом стенки распыливающего устройства нагреваются примерно до 750 К. Такое охлаждение форсунки обеспечивается за счет

интенсивного теплообмена с холодным топливом и его большой теплоемкостью, а также за счет большого массового расхода топлива. Само топливо нагревается уже на выходе из сопла форсунки в области распыления и взаимодействия с горячим воздухом.

6.2.2 Огневые экспериментальные исследования влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на горение керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14

Объектами исследования являются доработанный с позиций динамического конструирования экспериментальный образец пневматической форсунки (см. п. 5.3.3.1) и электрокаплеструйные форсуночные модули с различными параметрами электрического напряжения на электродах ЭУВТ. При этом используется уникальная научная установка: огневой стенд АО «Авиадвигатель», работающий на керосине, с реальной камерой сгорания авиационного двигателя ПД-14 с использованием современной измерительной аппаратуры с автоматической системой анализа и обработки интегральных параметров отработавших газов на выходе реальной камеры сгорания, характеризующих качество процессов распыла керосина и сгорания керосино-воздушной смеси.

Проведена серия испытаний экспериментальных образцов форсунок и форсуночных модулей в составе сектора реальной камеры сгорания газотурбинного двигателя ПД-14.

Ниже представлены результаты стендовых испытаний по определению основных характеристик камеры сгорания (КС) реального авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 в условиях пятигорелочного испытательного отсека с использованием в качестве распыливающих топливо устройств экспериментальных образцов пневматических форсунок с включением базового

ЭУВТ в цепь питания форсунок без подачи и с подачей электрического напряжения на электроды ЭУВТ от различных БП.

На рисунках 6.34 – 6.42 представлены фотографии, иллюстрирующие процесс проведения данных экспериментальных исследований.



Рисунок 6.34 – Полноразмерная камера сгорания авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 с топливными форсунками



Рисунок 6.35 – Пятигорелочный отсек камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 с фрагментом линии подвода подогретого до температуры 826 К воздуха под давлением до 22 атм

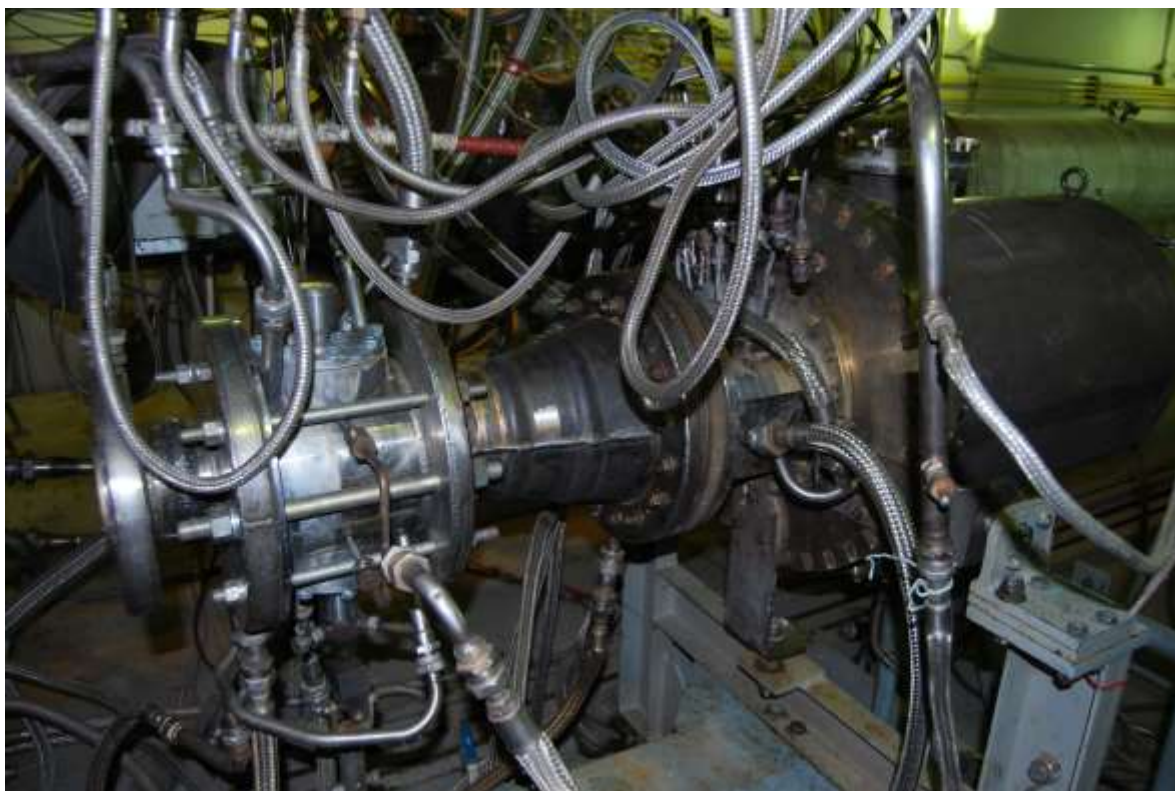


Рисунок 6.36 – Выход пятигорелочного отсека справа налево: водоохлаждаемые выходные мерный участок, проставка, дроссель; слева вверху-трубки подвода охлаждающей воды



Рисунок 6.37 – Пятигорелочный отсек КС авиадвигателя ПД-14. На выходном мерном участке видны гребенки температуры и пробоотборники вредных веществ продуктов сгорания керосино-воздушной смеси



Рисунок 6.38 – Общий вид рабочего бокса 27 с линиями для испытаний пятигорелочного отсека (слева) и полноразмерной камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 (справа)



Рисунок 6.39 – Линия подвода сжатого до 22 атм нагретого до температуры 826 К воздуха к пятигорелочному отсеку. В центре трубопровода видна врезанная мерная диафрагма расходомера воздуха



Рисунок 6.40 – ЭУВТ (вверху с красной надписью) в цепи подвода керосина к трем форсункам внешнего контура пятигорелочного отсека. Справа ЭУВТ виден белый провод дистанционного подвода электрического напряжения



Рисунок 6.41 – Изменение (из другого бокса) параметров электрического напряжения на электродах ЭУВТ варьированием БП при огневых испытаниях (по утвержденной программе) форсуночных модулей



Рисунок 6.42 – В звукотермоизолированном информационно-управляющем боксе при огневых испытаниях форсуночных модулей на пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя типа ПД-14

На рисунке 6.42 внизу дисплейный ряд слева направо: место инженера ОАИС; место ведущего инженера; управление топливом; управление охлаждающей водой; управление компрессорами; управление сжатым воздухом. На стене перед операторами: слева – направо: камера наблюдения за пятигорелочным отсеком камеры сгорания газотурбинного авиадвигателя; общий рабочий экран; камера наблюдения за полноразмерной камерой сгорания авиационного газотурбинного двигателя типа ПД-14.

6.2.2.1 Объекты огневых испытаний на пятигорелочном отсеке камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя ПД-14 влияния резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения керосино-воздушной смеси

Объектом испытания на пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного двигателя ПД-14 являются форсуночный модуль (рисунок 6.44). Форсуночный модуль включает в себя:

- доработанный с позиций динамического конструирования экспериментальный образец пневматической топливной форсунки;
- воздушный осевой завихритель Э-100-03-0770;
- электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ).

Форсуночный модуль входит в состав сектора 45° кольцевой КС (рисунок 6.43).

Сектор 45° выбран из возможностей стенда по давлению воздуха p_k и расходу воздуха G_b . Сектор 45° кольцевой КС отображает работу полноразмерной камеры сгорания на основании огромного опыта АО «ОДК-Авиадвигатель» в моделировании испытаний камер сгорания, и на основании ранее проводившихся испытаний, которые показали, что результаты испытаний на 45° секторе КС и результаты испытаний на полноразмерной КС совпадают. В состав сектора 45° кольцевой КС, представленной на рисунке 6.43, входит:

- жаровая труба (ЖТ) 100-03-8168 с наружной 1, внутренней 2 и фронтальной 3 стенками. На фронтальную стенку 3 устанавливаются завихрители 5. Объем ЖТ ограничен боковыми стенками 4;

- в составе сектора КС используются две форсунки с двумя распыливающими модулями как и на полноразмерной камере сгорания и одна специальная форсунка с одним распыливающим модулем 6;

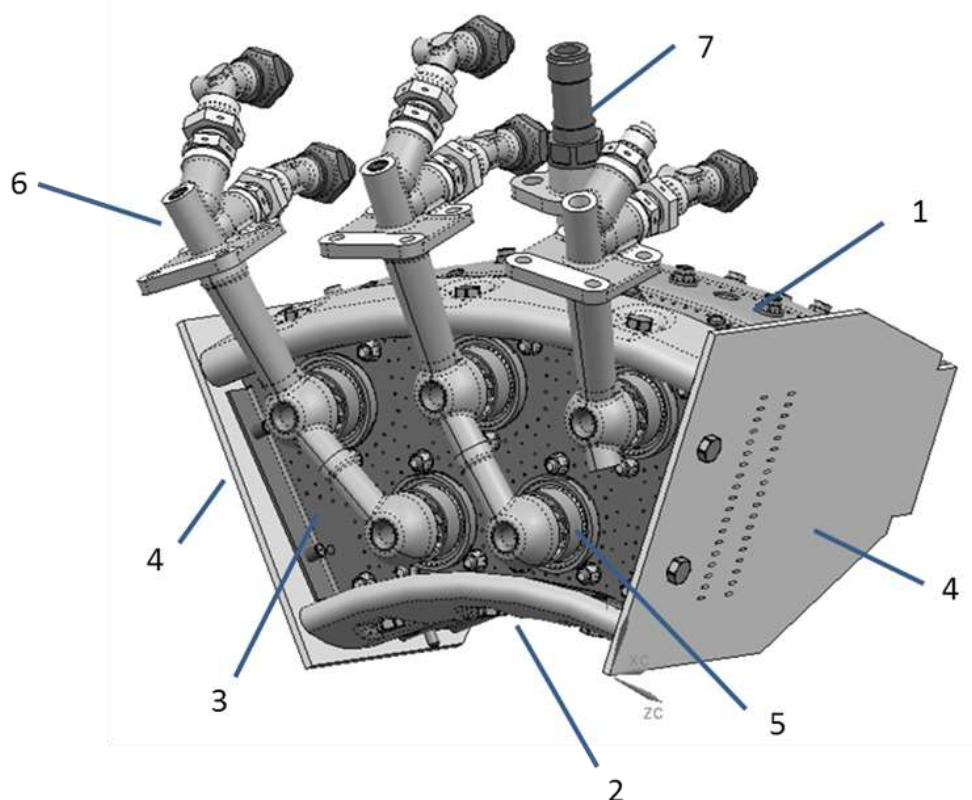
- для розжига топливо-воздушной смеси в КС используется одна стендовая свеча зажигания 7 СП-92П кл. К2-20, установленная на наружной стенке ЖТ 1 между форсуночными модулями 6 наружного яруса. Питание к свече зажигания 7 подводится от стендового агрегата зажигания ПВФ-22-20 через высоковольтный провод Э-94-09-8734.

Сектор КС в составе пятигорелочного отсека представлен на рисунке 6.44.

Конструкции сектора КС (рисунок 6.43) и пятигорелочного отсека (рисунок 6.44) полностью разъемные, что позволяет проводить переборки, замены

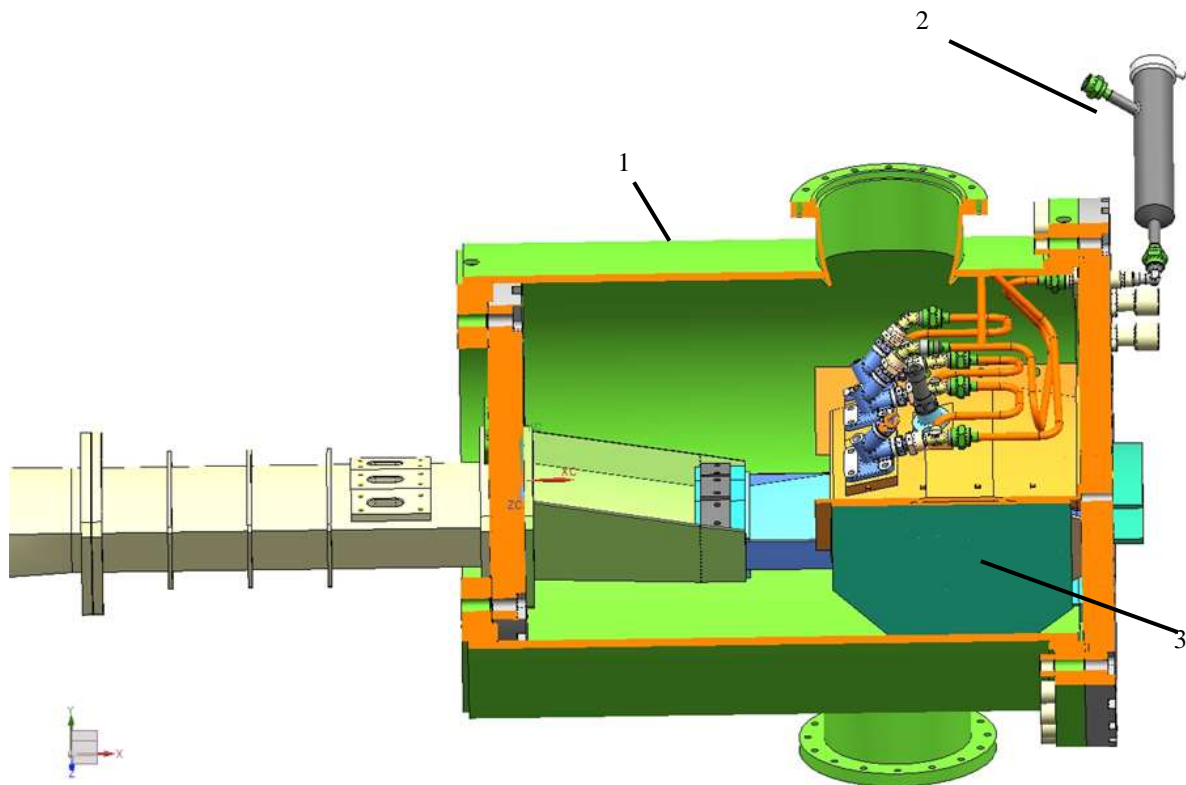
и доработки различных элементов конструкции с минимальными трудовыми и временными затратами.

Для определения влияния электрического напряжения на основные характеристики КС (эмиссия газообразных веществ) топливо (керосин) пропускается через электрическое устройство воздействия на топливо (рисунок 6.44). На ЭУВТ через различные варианты блоков питания (БП) подаются различные типы электрического напряжения.



- 1 – Стенка жаровой трубы наружная Э-100-03-8172;
- 2 – Стенка жаровой трубы внутренняя Э-100-03-8165;
- 3 – Стенка фронтальная Э-100-03-8163;
- 4 – Стенка жаровой трубы боковая Э-100-03-0509, -01;
- 5 – Завихритель;
- 6 – Топливные форсунки;
- 7 – Свеча зажигания СП-92П кл.К2-20.

Рисунок 6.43 – Сектор 45° кольцевой камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14



Трёхмерный РАБОЧАЯ Камера Трёхмерный

1 – Пятигорелочный отсек Э-100-03-8171

2 – ЭУВТ

3 – Сектор 45° кольцевой КС турбореактивного двигателя

Рисунок 6.44 – Трёхмерная модель пятигорелочного отсека Э-100-03-8171 с ЭУВТ

6.2.2.2 Принципиальная схема установки

ОАО «ОДК-Авиадвигатель» для испытаний камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя с электрокаплеструйными форсуночными модулями

Параметры установки ОАО «ОДК-Авиадвигатель»:

- давление воздуха перед отсеком $P_k = 0,5 \dots 23$ кгс/см²;
- температура воздуха перед отсеком $T_k = 150 \dots 550$ °С;
- расход воздуха $G_v = 0,1 \dots 3,7$ кг/с;

- коэффициент избытка воздуха за отсеком $\alpha \geq 2$.

Принципиальная пневмогидравлическая схема установки приведена на рисунке 6.45.

Назначение основных функциональных элементов установки рисунка 6.45: электроподогреватель воздуха (ТЭН) - для регулирования температуры воздуха от начальной величины (температура воздуха за компрессором) до температуры 550 °С; регулирующая заслонка (РЗК) - для автоматического поддержания давления воздуха за компрессором (перед заслонкой) на установленном для компрессора уровне (22...24 кгс/см², изб.); перепускные заслонки (ПЗ-1, ПЗ-2) - для перепуска воздуха из магистрали в атмосферу; регулирующая заслонка в магистрали (РЗМ) и дроссельная заслонка (ДЗ) - для регулирования давления воздуха перед отсеком.

Параметры, по которым настраивается режим испытания пятигорелочного отсека: P_k – давление воздуха перед отсеком; T_k – температура воздуха перед отсеком; $W_{\text{мид}}$ – миделевая скорость воздуха в отсеке; α – суммарный коэффициент расхода топлива в отсеке.

Заданная точность настройки и поддержания режимных параметров при испытании: P_k – ± 1 %; T_k – ± 2 °С; $W_{\text{мид}}$ – $\pm 1,5$ %; α – ± 2 %.

Настройка режима запуска (розжига) пятигорелочного отсека.

Исходное положение регулирующих элементов: РЗК – минимально открыта (~10 % по сл. зап. №281 ОПЭП); ПЗ-1 - полностью закрыта; ПЗ-2 – полностью открыта; РЗМ – полностью открыта; ДЗ – вместо управляемой заслонки установлена дроссельная шайба с проходным диаметром 53 мм; ТЭН – выключен.

Режим запуска задается величиной миделевой скорости $W_{\text{мид}}$, давлением перед отсеком P_k и расходом топлива G_t :

$W_{\text{мид}}$ – миделевая скорость (пропорциональна комплексу $G_b \cdot T_k / P_k$) - устанавливается директивно (диапазон изменения $W_{\text{мид}} = 8 \dots 10$ м/с, диапазон изменения расхода воздуха ориентировочно $G_b = 0,1 \dots 0,5$ кг/с);

P_k – давление перед отсеком – минимальное давление которое получается при настройке режима запуска (ориентировочно $P_k = 1,05 \dots 1,2$ кгс/см²).

G_T – расход топлива – устанавливается директивно (для жидкого и газообразного топлива $G_T = 0 \dots 0,007$ кг/с).

Алгоритм настройки режима.

Настройка параметров по воздуху. В связи с отсутствием возможности измерять расход воздуха на данном режиме из-за его небольшой величины, режим настраивается только по давлению воздуха. Если P_k меньше 1,08, то необходимо прикрыть ПЗ-2. Если P_k больше 1,08, то необходимо прикрыть РЗМ.

Настройка параметров по топливу. Включается система зажигания и подается топливо с заданным расходом (контролируется по давлению топливного газа в магистрали): по алгоритму: либо с плавным увеличением расхода до появления розжига (контроль – по температуре газов за отсеком), либо с резким увеличением расхода до заданной величины, т.е. броском. При плавном увеличении расхода топлива необходимо предусмотреть возможность автоматического поддержания заданного темпа нарастания расхода $G_T = 0,001 \dots 0,0002$ (кг/с)/с.

Настройка рабочего режима (после запуска пятигорелочного отсека).

Рабочий режим пятигорелочного отсека настраивается по заданным параметрам: P_k - давление перед отсеком ($P_k = 5 \dots 25$ кгс/см²); T_k – температура воздуха перед отсеком (до 550 °С); $W_{\text{мид}}$ - миделевая скорость в отсеке ($W_{\text{мид}} = 10 \dots 25$ м/с, $G_v = 0,5 \dots 4$ кг/с); $\alpha_{\text{отс}}$ – коэффициент избытка воздуха на выходе из отсека (пропорционален отношению $G_v/G_{T\Sigma}$; $G_{T\Sigma} = 0,005 \dots 0,1$ кг/с).

После розжига отсека необходимо выйти на режим: $P_k = 3,5$ кгс/см²; $T_k = 383$ °С; $W_{\text{мид}} = 17$ м/с; $\alpha_{\text{отс}} = 3,7$. Для этого необходимо:

- предварительно установить P_k и $\alpha_{\text{отс}}$ без подогрева воздуха путем последовательных шагов:

- 1) прикрыть перепускную заслонку ПЗ-2;
- 2) прикрыть заслонку РЗМ;

3) открыть заслонку РЗК;

4) увеличить подачу топлива.

Регулировку выполнить до **полного открытия** заслонки РЗК.

5) включить подогреватель воздуха и установить температуру T_k-383 °С;
(при раскачке параметров следует перейти на ручное управление ТЭНом).

6) откорректировать R_k (сначала - заслонкой РЗМ, затем заслонкой ПЗ-2 и оценить какой заслонкой удобнее регулировать);

7) откорректировать α отс.

При необходимости повторить корректировку R_k и α отс.

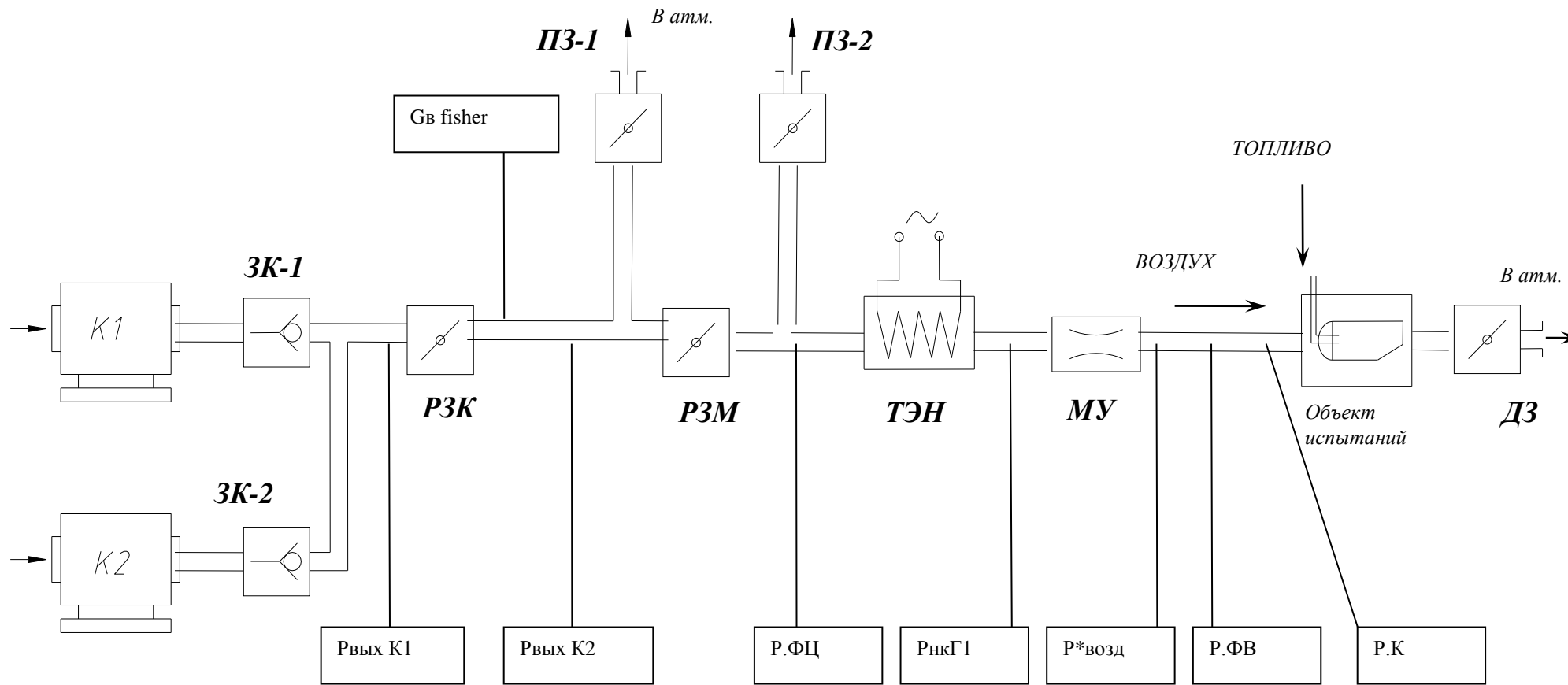
Миделевая скорость должна получиться в районе $17 \pm 0,5$ м/с.

Переход на более высокие параметры R_k , T_k и α отс:

1) прикрыть заслонку ПЗ-2 (после полного закрытия заслонки ПЗ-2 увеличение R_k осуществлять с помощью заслонки РЗМ); установить α отс; установить T_k .

6.2.2.3 Методика проведения огневых испытаний электрокаплеструйных форсуночных модулей с пневматической форсункой применительно к газотурбинным двигателям

Для проведения испытаний разработанных форсуночных модулей в состав испытательного стенда входит: электроподогреватель воздуха (ТЭН) предназначенный для регулирования температуры воздуха от начальной величины до температуры 600 °С; магистральные клапаны предназначены: МК1 – для поддержания абсолютного давления воздуха за электрическим центробежным компрессором Centak ($22 \dots 25$ кгс/см²); МК2 - регулирования абсолютного давления воздуха на входе в испытуемый отсек ($0 \dots 24$ кгс/см²); перепускные заслонки (СВ1, СВ2) предназначены для регулирования расхода воздуха через отсек; дроссельная заслонка (ДЗ) предназначена для моделирования площади проходного сечения соплового аппарата (СА) 1 ступени турбины высокого давления двигателя и миделевой скорости в испытуемом отсеке.



K1, K2 – воздушный компрессор
 ЗК-1, ЗК-2 – запорные клапаны
 РЗК – регулирующая заслонка компрессора
 РЗМ – регулирующая заслонка магистрали
 ПЗ-1, ПЗ-2 – перепускные заслонки
 ТЭН - электронагреватель
 МУ- мерное устройство
 ДЗ – дроссельная заслонка

Рвых К1 – давление за компрессором
 Рвых К2 – давление за регулирующей заслонкой компрессора
 Р.ФЦ – давление перед электронагревателем
 РнкГ1 - давление за электронагревателем
 Р*возд – давление за расходомером
 Р.ФВ – статическое давление перед отсеком
 Р.К – полное давление перед отсеком

Алгоритм настройки режимов огневого испытания форсуночных модулей

Настройка параметров по воздуху.

Включается ТЭН. Путём изменения положения МК2 плавно увеличивается p_k с темпом $0,025 \dots 0,028$ кгс/(см²*°С) до достижения нужного значения T_k и p_k согласно программе на испытание.

Если в исходном положении заслонок миделевая скорость $W_{\text{мид}}$ меньше заданной величины по программе испытаний, то моторист прикрывает СВ1, СВ2. При этом $W_{\text{мид}}$ возрастает за счет роста G_v несмотря на незначительное увеличение p_k .

Если в исходном положении заслонок $W_{\text{мид}}$ больше заданной величины по программе испытаний, то моторист прикрывает ДЗ. При этом $W_{\text{мид}}$ уменьшится за счет снижения массового расхода воздуха G_v .

Настройка параметров по топливу

Включается система зажигания и подается топливо с заданным расходом по заданному алгоритму. Мотористом устанавливается заданная величина $\alpha_{\text{отс}}$ за счет плавного уменьшения (увеличения) подачи топлива.

Автоматическая система (АС) измерения, управления и обработки параметров установки во время всего цикла испытаний обеспечивает:

- управление работой установкой и стендовыми системами в процессе испытания в автоматическом и ручном режимах, установление заданных режимов и параметров по заранее определенным алгоритмам с требуемой точностью;
- автоматическое измерение параметров установки и систем стенда, синхронизованное по времени, а также автоматическую фиксацию времени, даты и режима испытаний для последующего анализа и статистической обработки результатов;
- автоматическую фиксацию бесконтактных измерений характеристик воздушного потока или характеристик распыла в измерительной части установки, а также хранение результатов измерений на жёстком диске с автоматической фиксацией времени, даты и режима испытаний для последующего анализа;

- непрерывный вывод информации о контрольных параметрах установки, стендовых систем, процесса испытаний на экраны мониторов и табло в наблюдательной кабине;
- выдачу предупредительных сигналов при выходе параметров установки за пределы значений, установленных соответствующей нормативной документацией или распоряжением на испытание;
- вывод в наблюдательную кабину сигнализации об аварийной работе установки и систем стенда, а также выдачу автоматических команд для предотвращения аварии;
- предварительную обработку и анализ результатов испытаний в информационно-измерительной системе «Парус»;
- приём и регистрацию метеорологических параметров: температура, давление, относительная влажность атмосферного воздуха.

Перед сборкой пятигорелочного отсека проводятся гидроиспытания пятигорелочного отсека для проверки герметичности топливных трубопроводов и их соединений. Также для проверки герметичности проводятся гидроиспытания ЭУВТ. Гидроиспытания топливных трубопроводов и их соединений проводятся путем подачи топлива под давлением 90...95 кгс/см² в течение 3...5 минут, а ЭУВТ - путем подачи топлива под давлением 40...45 кгс/см² в течение 3...5 минут. Гидроиспытания проходят в боксе 21 станции 5 цеха 21 АО «ОДК-Авиадвигатель».

Испытания форсуночного модуля в составе пятигорелочного отсека Э-100-03-8171 проводится на линии 2 бокса 27 станции 5 цеха 21 АО «ОДК-Авиадвигатель».

Рабочее топливо – авиационный керосин по ГОСТ 10227-86.

При испытаниях форсуночного модуля в составе пятигорелочного отсека выполняется измерение следующих характеристик:

- коэффициента расхода воздуха через сектор КС;
- эмиссии газообразных веществ (ГВ).

Параметры рабочих режимов испытаний представлены в таблице 6.14. Параметры рабочих режимов выбраны в соответствии с 100-00-800ТУ150-7 «Исходные данные для проектирования газотурбинного двухконтурного двигателя ПД-14».

Подробная методика проведения испытания по определению основных характеристик конструктивного варианта КС представлена ниже.

Определение коэффициента расхода воздуха через сектор камеры сгорания.

Измерение коэффициента расхода воздуха через сектор КС выполняется посредством холодных продувок (без подачи топлива в КС).

Холодные продувки выполняются при отстыкованных переходнике и выходном дросселе. На выходном мерном участке в посадочные места под установку гребенок установлены заглушки.

Таблица 6.14 – Режимы проведения огневых испытаний конструктивного варианта КС с ЭУВТ в составе пятигорелочного отсека. 100-00-800ТУ150-7, МСА, Н=0, М=0

Параметр	Обозначение параметра	0,07 взлетного	Холодные продувки		
			2,8	3,0	3,4
Давление воздуха на входе в КС	p_K^* , кгс/см ²	5,27	2,8	3,0	3,4
Температура воздуха на входе в КС	T_K^* , °С	219	60	60	60
Коэффициент избытка воздуха	$\alpha_{КС}$	4,507	-	-	-
Миделевая скорость	$W_{Мид}$, м/с	6,34	-	-	-
Отношение расходов топлива от суммарного расхода	$G_{Т.НАР}/G_{Т.ВН}$, %	60/40	-	-	-
Тип испытания*		1	2	2	2
* - Тип испытаний: 1 – измерение эмиссии ГВ; 2 – измерение коэффициента расхода воздуха через сектора КС.					

Измерение коэффициента расхода воздуха проводится при трех значениях полного давления воздуха на входе в пятигорелочный отсек p_K^* согласно таблице 6.14.

Измерение эмиссии газообразных веществ

Измерение эмиссии ГВ и дыма выполнялось за один запуск, на режиме 0,07 взлетного (малый газ) согласно таблице 6.14.

Для измерения эмиссии ГВ к выходному мерному участку монтируется переходник и выходной дроссель. На выходном мерном участке (вид по полету, по часовой стрелке) монтируется приемник температуры Э-87-28-8037 для контроля розжига ТВС в КС. Приемник температуры Э-87-28-8037 имеет пять термопар типа платинородий (ТПР), схема приемника представлена в приложении В. Для отбора пробы газа в положения №2 и №4 (вид по полету, по часовой стрелке) на выходном мерном участке устанавливаются приемники отбора проб газа Э-87-28-8036. Приемники отбора проб газа Э-87-28-8036, используемые при испытаниях конструктивных вариантов КС в составе пятигорелочного отсека, имеют пять приемных отверстий диаметром 1,0 мм.

Схемы приемников отбора проб газа представлены в [154].

Проба газа от приемников отбора проб газа поступает в объединяющий коллектор и далее транспортируется до газоаналитической аппаратуры по обогреваемой магистрали транспортировки пробы.

Перечень газоанализаторов, использованных при испытаниях конструктивных вариантов КС в составе пятигорелочного отсека, представлен в таблице 6.15. Копии свидетельств о поверке газоанализаторов представлены в [154].

Газоанализатор углеводородов FIdamat 6 предназначен для определения индекса эмиссии НС (несгоревшие углеводороды). Индекс эмиссии НС (EI(НС)) считается по формуле 6.44. В ходе испытания форсуночных модулей показания с газоанализатора FIdamat 6 не выводились на электронный протокол информационно-измерительной системой “Парус”, так как на приборе отсутствует канал связи. Данные с прибора вручную выписывались на печатный

протокол. Результаты экспериментальных исследований влияния различных параметров электрического напряжения на электродах ЭУВТ на несгоревшие углеводороды отражены в таблице 6.17 и представлены на рисунке 6.52.

Таблица 6.15 – Перечень газоанализаторов, используемых при огневых испытаниях форсуночных модулей с доработанной с позиций динамического конструирования пневматической форсункой

Наименование газоанализатора	Измеряемые компоненты	Номер свидетельства о поверке	Дата поверки	Срок действия поверки
Testo-350 №60262280048	O ₂ , CO, NO, NO ₂ (электрохимические ячейки); CO ₂ – расчет	№085395127	08.04.2016г	08.04.2017г
Testo-350 №60262280049	O ₂ , CO, NO, NO ₂ (электрохимические ячейки); CO ₂ – расчет	№092140770	07.10.2016г	07.10.2017г
MGA 5+ №061863	CO ₂ , CO, NO _x (инфракрасные ячейки); O ₂ – Электрохимическая ячейка	238/10	11.10.2016г	10.10.2017г
Fidamat 6	HC	242/8334-2016	18.11.2016г	17.11.2017г

6.2.2.4 Методика обработки экспериментальных данных при проведении огневых испытаний электрокаплеструйных форсуночных модулей с пневматической форсункой применительно к газотурбинным двигателям

Коэффициент расхода воздуха через сектор камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14

Коэффициент расхода A_i на i -ом режиме определяется по формуле [154]

$$A_i = G_B \cdot \sqrt{T_K^*} \cdot \frac{1}{p_K^*}, \quad (6.33)$$

где G_B – расход воздуха на входе в пятигорелочный отсек КС, кг/с;

T_K^* - полная температура воздуха на входе в пятигорелочный отсек, К;

p_K^* - полное давление воздуха на входе в пятигорелочный отсек, кгс/см².

Характерное значение коэффициента расхода воздуха через сектор КС для конструктивного варианта КС определяется как среднеарифметическое коэффициентов расхода воздуха A_i , определенное при трех значениях p_K^*

$$A_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i}{3} \quad (6.34)$$

Пересчет коэффициента расхода воздуха через сектора КС в эффективную площадь $F_{эфф}$, см², можно выполнить по формуле [154]:

$$F_{эфф} = A_{cp} \cdot 2,524 \quad (6.35)$$

Эмиссия газообразных веществ

Исходя из особенностей газоанализатора ТНМН-451, для расчета концентрации несгоревших углеводородов НС используются формулы аппроксимации [154].

При концентрации несгоревших углеводородов НС в диапазоне от 0 до 10 ppmC (*ppmC-миллионная доля - единица измерения каких-либо относительных величин, равная 1·10⁻⁶ от базового показателя*). Аналогично по смыслу, проценту или промилле) используются формулы:

$$[НС] = -0,024 + 1,639 \cdot x - 0,066 \cdot x^2, \quad (6.36)$$

$$x = m + 3 \cdot n \quad (6.37)$$

где m – измеренная концентрация по каналу «метана», ppmC; n – измеренная концентрация по каналу «неметан», ppmC.

Для концентраций несгоревших углеводородов в диапазоне выше 10 ppmC используют формулы:

$$[HC] = -7,202 + 1,21 \cdot x + 2,615 \cdot 10^{-3} \cdot x^2, \quad (6.38)$$

$$x = 0,59 \cdot (m + 4,77 \cdot n) \quad (6.39)$$

В соответствии со Стандартом ИКАО (Приложение 16, Том II, Глава 2), нормируемыми величинами по эмиссии ГВ авиационных двигателей являются параметры эмиссии ГВ, определяемые как отношение массы загрязняющего компонента выброшенного в атмосферу за стандартный взлетно-посадочный цикл (СВПЦ) к взлетной тяге двигателя в условиях высоты полета $H=0$ и числа Маха $M=0$. Параметр эмиссии является комплексным параметром, учитывающим эмиссионное совершенство КС (по характеристике – индекс эмиссии EI) и экономичность двигателя. *Индекс эмиссии EI – отношение количества граммов загрязняющего вещества на килограмм сгоревшего топлива (г/кг).* В условиях испытаний конструктивных вариантов КС с форсуночными модулями в составе пятигорелочного отсека, расчет параметра эмиссии не выполняется. Сравнение вариантов выполняется только по эмиссионной характеристике – индексу эмиссии.

Расчет индексов эмиссии ГВ выполнен по методике, представленной в Стандарте ИКАО (Приложение 16, Том II, Добавление 3, п.7).

Отношение массового расхода воздуха к массовому расходу топливу AFR определяется по формулам [154]:

$$AFR = (P_0/m) \left(\frac{M_{\text{ВОЗДУХА}}}{M_C + (n/m)M_H} \right), \quad (6.40)$$

$$(P_0/m) = \frac{2Z - n/m}{4(1 + h_{vol} - [TZ/2])} \quad (6.41)$$

$$Z = \frac{2 - [CO] - ([2/x] - [y/2x])[HC] + [NO_2]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \quad (6.42)$$

где $M_{\text{ВОЗДУХА}}$ – молярная масса сухого воздуха равна 28,966 г; M_{C} – молярная масса углерода равна 12,011 г; M_{H} – молярная масса водорода равна 1,008 г; n/m – величина отношения атомов водорода к атому углерода используемого топлива. В выполненных расчетах величина n/m принята 1,95; Значение m принято равным 12,52; x – количество атомов С в характеристической молекуле выхлопных углеводородов равно 1; y – количество атомов Н в характеристической молекуле выхлопных углеводородов равно 4; T – концентрация CO_2 в сухом воздухе по объему равна 0,0003; h_{vol} – влажность окружающего воздуха (объем воды/объем сухого воздуха); $[\text{HC}]$ – средняя концентрация выхлопных углеводородов (объем/объем во влажных условиях), выраженных как углерод; $[\text{CO}]$ – средняя концентрация CO (объем/объем во влажных условиях); $[\text{CO}_2]$ – средняя концентрация CO_2 (объем/объем во влажных условиях); $[\text{NO}_2]$ – средняя концентрация NO_2 в выхлопной пробе (объем/объем во влажных условиях).

Индексы эмиссии компонентов CO , HC и NO_x определяются по следующим формулам [154]:

$$\text{EI}(\text{CO}) = \left(\frac{[\text{CO}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{CO}}}{M_{\text{C}} + (n/m)M_{\text{H}}} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (6.43)$$

$$\text{EI}(\text{HC}) = \left(\frac{[\text{HC}]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{HC}}}{M_{\text{C}} + (n/m)M_{\text{H}}} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (6.44)$$

$$\text{EI}(\text{NO}_x) = \left(\frac{[\text{NO}_x]}{[\text{CO}_2] + [\text{CO}] + [\text{HC}]} \right) \left(\frac{10^3 M_{\text{NO}_2}}{M_{\text{C}} + (n/m)M_{\text{H}}} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (6.45)$$

где M_{CO} – молярная масса CO равна 28,011 г; M_{HC} – молярная масса углеводородов в выхлопной пробе, принимается как $\text{CH}_4=16,043$ г; M_{NO_2} –

молярная масса NO_2 равна 46,008 г; $[\text{NO}_x]$ – средняя концентрация NO_x (объем/объем во влажных условиях), определяемая как $[\text{NO}]+[\text{NO}_2]$.

В отличие от Стандарта ИКАО (Приложение 16, Том II, Добавление 3, п.7.1.4) приведение $\text{EI}(\text{NO}_x)$, $\text{EI}(\text{CO})$ и $\text{EI}(\text{HC})$ к p_k^* не выполняется, но выполняется приведение $\text{EI}(\text{NO}_x)$ к стандартной влажности по методике Стандарта ИКАО (Приложение 16, Том II, Добавление 3, п.7.1.4). Таким образом, приведенное значение $\text{EI}(\text{NO}_x)_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле:

$$\text{EI}(\text{NO}_x)_{\text{пр}} = \text{EI}(\text{NO}_x) \cdot \exp(19[h_{\text{mass}} - 0,00634]) \quad (6.46)$$

где h_{mass} – влажность окружающего воздуха (кг воды/кг сухого воздуха).

Особенностью испытаний на линии 2 бокса 27 АО «ОДК – Авиадвигатель» является то, что в качестве рабочего тела используется сжатый воздух после центробежных электрических компрессоров Centac, которые обеспечивают суммарный расход воздуха $G_b=4$ кг и давление $P_k=24$ кгс/см² на входе в пятигорелочный отсек, необходимые для выхода на режим 85 % от взлетного. В компрессорах Centac после первых двух ступеней повышения давления установлены специальные холодильники с системой дренирования конденсата воды, поэтому абсолютная влажность воздуха на входе в пятигорелочный отсек может отличаться от влажности атмосферного воздуха. Методика расчета скорректированной абсолютной влажности воздуха представлена ниже.

В таблице 6.16 и на рисунке 6.46 представлена зависимость максимальной абсолютной влажности воздуха от температуры. По этим данным определяется максимальная возможная влажность воздуха за ступенью компрессора $A_{\text{СТ.МАХ}}$ (при относительной влажности 100 %) при соответствующей температуре воздуха за ступенью компрессора $T_{\text{СТ}}$ полагая, что водный конденсат отводится в дренаж.

По формуле определяется соотношение удельных объемов воздуха перед компрессором и за ступенью сжатия:

(6.47)

$$K_V = \frac{(T_{CT} + 273,15) \cdot (p_{CT} + p_H)}{(T_{CT} + 273,15) \cdot p_H}$$

Далее по формуле (6.48) определяется абсолютная влажность воздуха, отнесенная к параметрам воздуха на входе в компрессор:

Таблица 6.16 – Максимальная абсолютная влажность воздуха в зависимости от температуры

T, °C	A, г/м ³	T, °C	A, г/м ³	T, °C	A, г/м ³	T, °C	A, г/м ³
-50	0,063	-10	2,361	30	30,360	70	196,940
-49	0,070	-9	2,545	31	32,040	71	205,020
-48	0,078	-8	2,741	32	33,800	72	213,370
-47	0,087	-7	2,950	33	35,640	73	221,990
-46	0,096	-6	3,173	34	37,570	74	230,900
-45	0,107	-5	3,411	35	39,580	75	240,110
-44	0,118	-4	3,665	36	41,690	76	249,610
-43	0,131	-3	3,934	37	43,890	77	259,420
-42	0,145	-2	4,222	38	46,190	78	269,550
-41	0,160	-1	4,527	39	48,590	79	280,000
-40	0,177	0	4,852	40	51,100	80	290,780
-39	0,196	1	5,197	41	53,710	81	301,900
-38	0,216	2	5,563	42	56,440	82	313,360
-37	0,237	3	5,952	43	59,290	83	325,180
-36	0,261	4	6,364	44	62,250	84	337,360
-35	0,287	5	6,801	45	65,340	85	349,910
-34	0,316	6	7,264	46	68,560	86	362,840
-33	0,346	7	7,754	47	71,910	87	376,160
-32	0,380	8	8,273	48	75,400	88	389,870
-31	0,416	9	8,822	49	79,030	89	403,990
-30	0,455	10	9,403	50	82,810	90	418,520
-29	0,498	11	10,020	51	86,740	91	433,470
-28	0,544	12	10,660	52	90,820	92	448,860
-27	0,594	13	11,350	53	95,070	93	464,680
-26	0,649	14	12,070	54	99,480	94	480,950
-25	0,707	15	12,830	55	104,060	95	497,680
-24	0,770	16	13,630	56	108,810	96	514,880
-23	0,838	17	14,480	57	113,750	97	532,560
-22	0,912	18	15,370	58	118,870	98	550,730
-21	0,991	19	16,310	59	124,190	99	569,390

-20	1,076	20	17,300	60	129,700	100	588,560
-19	1,168	21	18,330	61	135,410	-	-
-18	1,266	22	19,420	62	141,330	-	-
-17	1,372	23	20,570	63	147,470	-	-
-16	1,486	24	21,780	64	153,830	-	-
-15	1,608	25	23,040	65	160,410	-	-
-14	1,739	26	24,370	66	167,230	-	-
-13	1,879	27	25,760	67	174,280	-	-
-12	2,029	28	27,220	68	181,580	-	-
-11	2,190	29	28,750	69	189,130	-	-

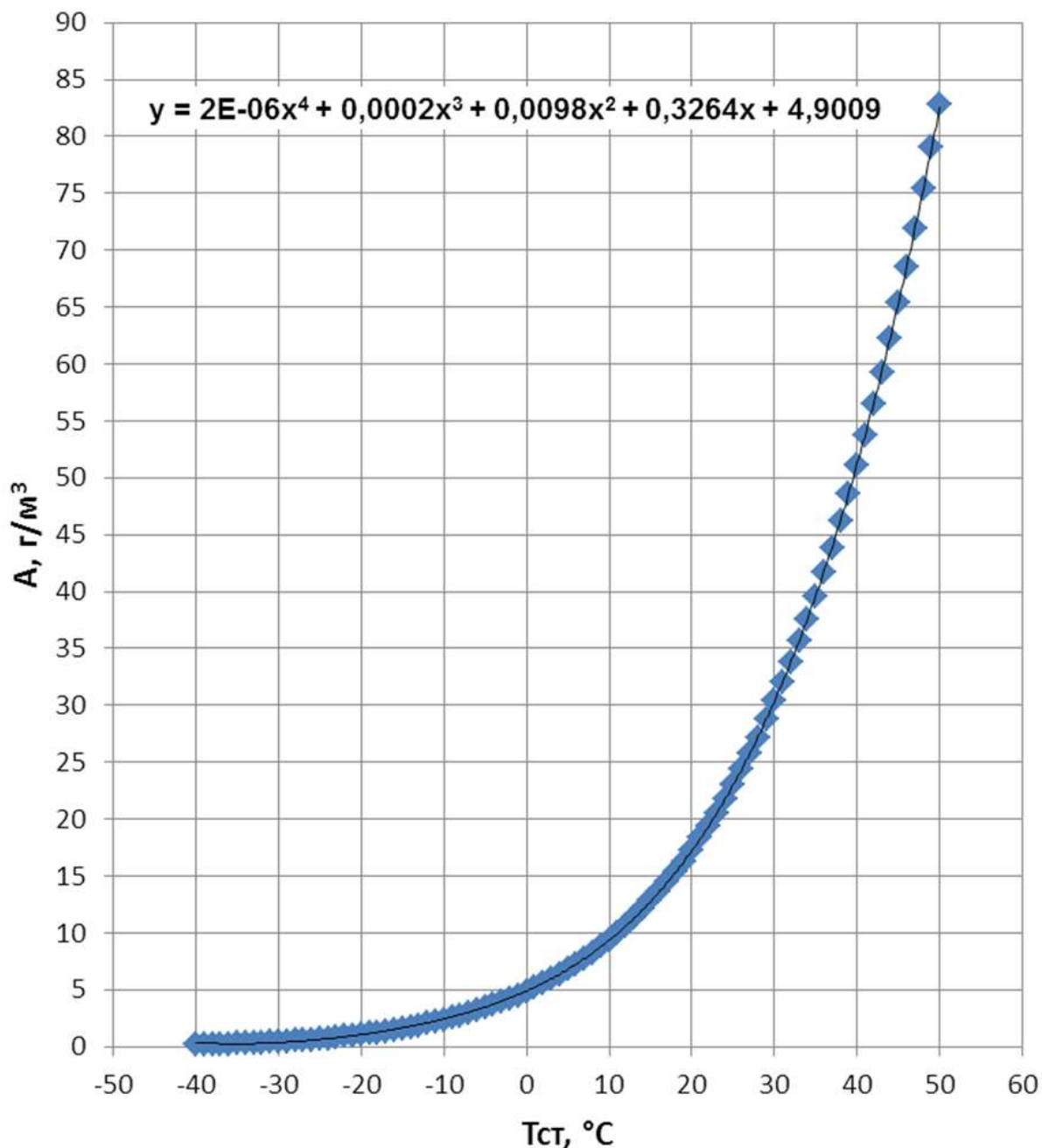


Рисунок 6.46 – Аппроксимационная зависимость максимальной абсолютной влажности воздуха от температуры

$$A_{\text{ВХ}} = \frac{A_{\text{СТ.МАХ}}}{K_V} \quad (6.48)$$

По данным таблицы 6.16 и рисунка 6.46 определяется максимально возможная влажность воздуха на входе в компрессора Centac $A_{\text{ВХ.МАХ}}$ (при относительной влажности 100 %) при соответствующей температуре $T_{\text{Н}}$.

Определяется относительная влажность воздуха на входе в компрессор Centac при абсолютной влажности, приведенной к влажности за ступенью повышения давления (после холодильника) по формуле:

$$\varphi_{\text{ВХ}} = \frac{A_{\text{ВХ}}}{A_{\text{ВХМАХ}}} \cdot 100, \% \quad (6.49)$$

Далее сравнивается относительная влажность атмосферного воздуха $\varphi_{\text{Н}}$ и относительная влажность воздуха на входе в компрессора Centac $\varphi_{\text{ВХ}}$, определенной по формуле (6.49). Если влажность $\varphi_{\text{Н}} \leq \varphi_{\text{ВХ}}$, то в формулах расчета индексов эмиссии (6.40) – (6.46) используется относительная влажность атмосферного воздуха $\varphi_{\text{Н}}$. Если влажность $\varphi_{\text{Н}} > \varphi_{\text{ВХ}}$, то в формулах расчета индексов эмиссии (6.40) – (6.46) используется относительная влажность воздуха, определенная по формуле (6.49).

6.2.2.5 Результаты огневых экспериментальных исследований процессов горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14 с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания пневматической топливной форсунки

При проведении огневых экспериментов осуществлялось сравнение и оценка влияния конструктивного варианта КС авиационного двигателя типа ПД-14 без подачи и с подачей электрического напряжения на электроды ЭУВТ выполнялось по эмиссии газообразных веществ. При этом ЭУВТ-3, как базовый по результатам предыдущих исследований, был включен во внешний контур пятигорелочного отсека с нагрузкой одновременно на три пневматические форсунки (см. рисунок 6.40). При этом две пневматические форсунки внутреннего контура также работали, но без ЭУВТ.

По остальным измеряемым при испытании пятигорелочного отсека характеристикам сравнение не выполнялось.

Исследовалось влияние параметров электрического напряжения на электродах таких форсуночных модулей от различных БП (см. рисунки 6.41, 5.42) на эмиссию газообразных веществ при сгорании керосино-воздушной смеси

Обобщенные результаты измерения эмиссии ГВ в зависимости от вида БП представлены в таблице 6.17. На рисунках 6.50 – 6.52 представлено сравнение эмиссионных характеристик конструктивного варианта форсуночного модуля с применением разных блоков питания.

Как видно из таблицы 6.17, коэффициент K_a , характеризующий представительность проб отработавшего газа (мера репрезентативности измерения на входе в камеру сгорания и на выходе из камеры сгорания авиационных газотурбинных двигателей) при измерении эмиссии ГВ, на всех измеренных точках для всех проверенных конструктивных вариантов БП не превышает установленных Стандартом ИКАО (Добавление 3 п.6.4) предельных значений $\pm 15\%$ для режима МГ (см. рисунок 6.53).

Уровень содержания несгоревших углеводородов НС и оксидов углерода СО в отработавших газах характеризует полноту сгорания топлива $\eta_{КС}$.

$$\eta_{КС} = 1 - 0,00024 \cdot [EI(CO) + 4,83 \cdot EI(НС)], \% \quad (6.50)$$

Как видно из таблицы 6.17, полнота сгорания топлива $\eta_{КС}$ для всех проверенных конструктивных вариантов КС соответствует требованиям ТЗ №2013-203: $\eta_{КС} \geq 0,950$ – на режиме МГ.

Нормируемой величиной по эмиссии ГВ для каждого компонента, в соответствии со Стандартом ИКАО является параметр эмиссии i -го компонента, определенный за стандартный взлетно-посадочный цикл ИКАО (LTO). Цикл LTO основан на типичных для периодов высокой активности крупных аэропортов данных о продолжительности работы двигателя на четырех режимах: руление/малый газ, взлет, набор высоты и заход на посадку.

Для компонентов CO и HC максимальный относительный вклад в параметры эмиссии вносит режим земного малого газа (7 % от взлетного режима согласно рисунку 6.47). Земной малый газ – режим работы от момента запуска основного двигателя и до начала разбега для взлета и от момента выруливания с ВПП до полной остановки основного двигателя. CO образуются в результате неполного сгорания топлива. Это может быть вызвано следующими причинами:

- низкая скорость горения в первичной зоне вследствие недостатка топлива и нехватка времени пребывания;
- недостаточное перемешивание топлива и воздуха, в результате чего образуются зоны, в которых смесь слишком бедна, чтобы в них поддерживалось горение, а также зоны с излишне богатой смесью, горение в которых приводит к высоким местным концентрациям CO;
- «замораживание» продуктов горения, вовлекаемых в слои воздуха, охлаждающие стенки жаровой трубы.

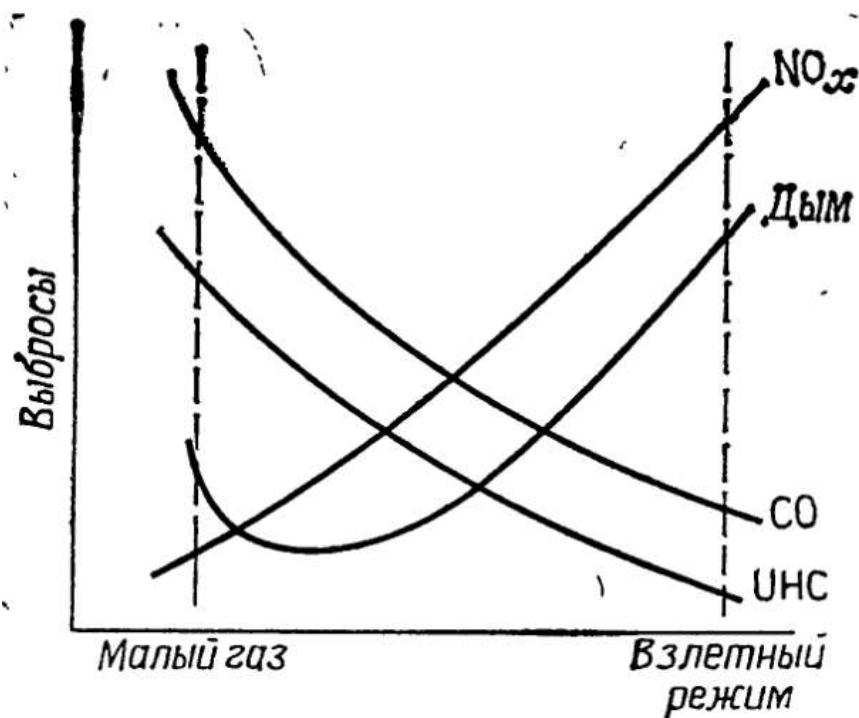


Рисунок 6.47– Характеристики выбросов загрязняющих веществ от газотурбинного авиационного двигателя

В связи с вышеперечисленным, именно этот режим малого газа при работе газотурбинного авиадвигателя выбран для сравнительного анализа влияния электрических полей в электрических устройствах воздействия на топливо на процессы горения керосино-воздушной смеси в реальной камере сгорания по соответствующим характеристикам горения относительно отсутствия электрического поля в ЭУВТ.

Протоколы всех проведенных испытаний представлены в [154] при разных параметрах электрического напряжения на электродах ЭУВТ (разных БП). При этом предусмотрено, что БП управляются унифицированным электрическим сигналом

(0 – 5) В.

В качестве примера на рисунках 6.48, 6.49 представлены протоколы огневых испытаний форсуночных модулей при работе пятигорелочного отсека авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 на режиме малого газа, формируемые автоматической информационной измерительной системой (ИИС) «Парус» без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ от БП-5 и при подаче электрического напряжения на электроды ЭУВТ от БП-5.

Как видно из таблицы 6.17, рисунков 6.50 – 6.52, вариант форсуночного модуля с использованием блоков питания № 5 и № 3/1 показал существенное снижение эмиссии СО на режиме 7 % взлетной тяги при подаче электрического напряжения на электроды ЭУВТ по сравнению с вариантом отсутствия электрического напряжения на электродах ЭУВТ. Данные результаты свидетельствуют об улучшении качества сгорания керосино-воздушной смеси в в реальной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя на низких режимах его работы при использовании ЭУВТ.

Протокол испытания отсека

на 2 линии бокса 27

Номер замера - 11

27.12.2016

19.11.26

Распоряжение & И-2016-1101.

Измерение выбросов ВВ (с ЭУВТ).

Испытания по плану АПП-0157-2016

Изданию Пятигорелочный отсек Э-100-03-8171 вариант А03 МЗ (мероприятие с установкой ступок)
Форсунок 100-03-911-2 шт. (А3527549, 3527558) и Э-100-03-8174-1шт. (А3529051)
с зазором между торцом головки и торцом захригеля 5,7±0,5 мм
ЖТ Э-100-03-8106 [2], собранная по с/з МЗ-16-5777

Внутр. стенка Э-100-03-В165 - на 1 секции отв. заварены, на 2 секции - 3 отв. d=17,5 мм, на 3 секции - 3 отв. d=7,7 мм.
Наруж. стенка Э-100-03-В172 - на 1 секции отв. заварены, на 2 секции - 3 отв. d=17,5 мм, на 3 секции - 2 отв. d=9,5 мм.
Отв. на 2 секц. смещены отн. верт оси: на нар. ст. на 5 гр. по ч.с., на внутр. ст. на 2,5 гр. против ч.с.

Распред. воздуха между рядами осн. отверстий на стенках нар. и внутр. -83,7/16,3%
Распред. воздуха между нар. и внутр. стенками ЖТ-50/50%, фр. стенка Э-100-03-8100-01 с осевыми захвир. Э-100-03-9760 (А=0,154, крутка 50 гр, d=15 мм).

Боковые стенки с ТЛП. На одной стенке вып. доп. перфорация (правая по полету)
Выходной мерный уч. 45511-006-00 Б/у, переходник 45511-002-00, дросель 45511-004-00

Стык между ЖТ и переходником Э-100-03-0638 уплотнен нитью ТРГ скрученной вдвойне.

Стыки бок. стенок между нар. и внутр. уплотнены по сл. зап. МЗ-16-5777

Перебран стык меж. аз. МУ и крайкой отс. Верх. крайка отс. уплотнена герметиком.

прикр. сист. охл. (137 отв. d=1,2 мм.)
При измерении пола Т1
Установлено 5 гребенок Э-126-20-0002 ХА.
При измерении выбросов ВВ:
Гребенка ТХА в положении А1.
Пробоотборники ВВ в положении Б2, Б4.
В положении Б3, Б5 залужки.

Измеренные параметры

ТГ1.5 =13.5	ТГ2.5 =13.8	ТГ3.5 =13.8	ТГ4.5 =13.3	ТГ5.5 =13.5
ТГ1.4 =13.5	ТГ2.4 =13.9	ТГ3.4 =13.9	ТГ4.4 =13.6	ТГ5.4 =13.6
ТГ1.3 =13.6	ТГ2.3 =13.9	ТГ3.3 =13.8	ТГ4.3 =13.5	ТГ5.3 =13.6
ТГ1.2 =13.7	ТГ2.2 =13.9	ТГ3.2 =13.8	ТГ4.2 =13.5	ТГ5.2 =13.6
ТГ1.1 =13.9	ТГ2.1 =14.1	ТГ3.1 =13.8	ТГ4.1 =13.5	ТГ5.1 =13.5

ТГ.МІМ1 =13.5	ТГ.МІМ2 =13.5	ТГ.МІМ3 =13.5	ТГ.МІМ4 =13.5	ТГ.МІМ5 =13.3
ТГ.СР1 =13.7	ТГ.СР2 =13.7	ТГ.СР3 =13.7	ТГ.СР4 =13.7	ТГ.СР5 =13.6
ТГ.МАХ1 =14.1	ТГ.МАХ2 =13.9	ТГ.МАХ3 =13.9	ТГ.МАХ4 =13.9	ТГ.МАХ5 =13.8

ТЭ.МІМ1 =1.001	ТЭ.МІМ2 =1.001	ТЭ.МІМ3 =1.001	ТЭ.МІМ4 =1.001	ТЭ.МІМ5 =1.002
ТЭ.СР1 =1.000	ТЭ.СР2 =1.000	ТЭ.СР3 =1.000	ТЭ.СР4 =1.000	ТЭ.СР5 =1.000
ТЭ.МАХ1 =0.998	ТЭ.МАХ2 =0.999	ТЭ.МАХ3 =0.999	ТЭ.МАХ4 =0.999	ТЭ.МАХ5 =0.999

ТГ.СР =13.674 град.С	Полн.ср1=0.302 Б/р
ТГ.МАХ =14.969 град.С	Полн.ср2=0.315 Б/р

Т.К1 =221.0 град.С	Ртвнар =4.334 кгс/см2	ТохВык1 =17.1 °С	ТГпр.1 =468.5
Т.К2 =220.2 град.С	Г.Т1st =25.457 кг/ч	ТохВык2 =14.9 °С	ТГпр.2 =17014.5
Т.К3 =215.6 град.С	Тнар =39.850 град.С	ТохВык3 =14.7 °С	ТГпр.3 =714.1
Р.К =4.252 кгс/см2	Рнар =4.470 кгс/см2	ТохВык4 =11.3 °С	ТГпр.4 =510.1
РН =739.189 мм рт.ст	ГТнар =0.0071 кг/с	ТохВык5 =15.4 °С	ТГпр.5 =584.9
РН.кг =1.005 кгс/см2	ГТнар =0.0071 кг/с	ТохВык9 =19.5 °С	ТГпр.СР =714.1
Р.МД =4.261 кгс/см2	Ртвм =4.346 кгс/см2	РышМУ =28.798 кгс/см2	ТГпр.МАХ =714.1
ДР.МД =209.229 мм М20	Г.Т2st =17.001 кг/ч	РышПро1 =21.304 кгс/см2	
Твозд =220.5 град.С	Твн =51.088 град.С	РышПро2 =0.116 кгс/см2	Тпр1 =-68.2
	Рвн =4.413 кгс/см2	РышДр3 =19.605 кгс/см2	Тв1_#2 =142.7 °С
	ГТвн =0.0047 кг/с	РышКДр3 =20.854 кгс/см2	Тв_выш1 =221.9 °С
Т.КОР.1 =-68.2 град.С	Ртвн =0.0047 кг/с	Рводм =-3.031 кгс/см2	О2.изм =16.240 %
Т.КОР.2 =-15.8 град.С	Ртвн =0.0047 кг/с	Ур.воды =4.311 м.вд.ст	СО2.изм =3.500 %
Т.КОР.3 =-51.3 град.С	Ртвн =0.0047 кг/с		НО.изм =0.000 ppm
ВПроб =0.030 кг/см2	Тх.контр=165.8 град.С		NO2.изм =0.000 ppm
РВык_му =0.005 кгс/см2			NOx.изм =61.526 ppm
дРкс% =0.572 %			СО.изм =322.000 ppm
ТН =0.000 °С	ТН.Х =-5.100 °С		А1га.Хим=4.103
РН =0.000 %	РН.Х =93.100 %		Е1_НОх =5.900
АН1 =0.000 г/м3	АН2 =0.000 г/м3		Е1_СО =18.781
РН1 =0.000 %	РН2 =0.000 %		Ка =-8.194 %
ТН1 =0.000 °С	ТН2 =0.000 °С		

Расчетные параметры

ТК =218,9 град.С	ГТнар =0.0071 кг/с	Г.В =0.774 кг/с
Р.КАБС =5.257 кгс/см2	ГТнар% =59.9578 %	
Г.В =0.774 кг/с		
W =6.45 м/с	ГТвн =0.0047 кг/с	
АП =4.467	ГТвн% =40.0422 %	
V.об =0.140		
А =3.26827	Г.Тсум =0.0118 кг/с	
ЛЯ =0.00		

Константы для расчета

ДФАЯ =0.1000 Б/р	руНОРА3 =0.00 %
Ф.МВД3 =328.8000 см2	рНОРА3% =0.00 %
Н.к =10250.0000 Б/р	ПРКС% =24.73
Э.Г.к =54.5200 Б/р	рЭВД% =85.4 %
Лк =14.7000 Б/р	РЗВ% =15.5 %
В.28 =0.7850 г/см3	Т1-Б31 =157.731 °С
А5-1 =0.0003 п/с	Р1-Б31 =1.020 МПа
В5-1 =0.0002 п/мм	дР1-Б31 =25.288 кПа
А5 =0.0003 п/с	Т2-Б31 =163.064 °С
В5 =0.0002 п/мм	Р2-Б31 =1.021 МПа
	дР2-Б31 =25.005 кПа

Технологические параметры

ТводвхК=23.10 град.С	К1.Р1 =2.37	К2.Р1 =2.45
ТвхК1 =-4.68 град.С	К1.Р2 =8.65	К2.Р2 =9.67
ТвхК1 =157.06 град.С	К1.Т1 =24.18 °С	К2.Т1 =24.38 °С
РвхК1 =10.55 кгс/см2	К1.Т2 =29.44 °С	К2.Т2 =27.82 °С
	К1.Т3 =157.06 °С	К2.Т3 =163.25 °С
ТвхК2 =-3.79 град.С	К1.InVal=100.00 %	К2.InVal=100.00 %
ТвхК2 =163.70 град.С	К1.ByVal=0.00 %	К2.ByVal=0.00 %
РвхК2 =18.55 кгс/см2	К1.I =102.21 А	К2.I =104.40 А
Г1-Б31 =1.954 кг/с	Г-Б31 =3.938 кг/с	
Г2-Б31 =1.984 кг/с	Общ.мощ.=96.90 кВт	

Рисунок 6.49 – Протокол испытаний форсуночного модуля с напряжением от БП-

Таблица 6.17 – Обобщенные результаты огневых испытаний форсуночного модуля при различных электрических напряжениях на электродах ЭУВТ от соответствующих электрических блоков питания (БП), включенного в цепь питания доработанных с позиций динамического конструирования пневматических форсунок

Блок питания	СО _{изм.} , ррм	NO _x _{изм.} , ррм	HC _{изм.} , ррм	EI(NO _x) Г/кг Т	EI(CO) Г/кг Т	EI(HC) Г/кг Т	η _{КС} , %	К _а , %
Экспериментальный образец форсунки (Вариант без блока питания)	361.0	61.0	423.0	5.86	21.10	14.14	0.978	-9.4
БП ½	359.7	60.7	216.3	5.84	21.04	7.24	0.986	-9.2
БП 5	322.7	61.3	180.7	5.82	18.62	5.96	0.988	-9.1
БП 3/1	326.0	61.0	219.0	5.81	18.88	7.25	0.987	-7.8
БП минус	331.7	60.7	415.7	5.69	18.93	13.57	0.979	-10.0
БП 4	332.0	60.0	402.0	5.67	19.09	13.22	0.980	-8.1
Генератор импульсов	338.3	64.3	411.7	6.04	19.33	13.45	0.979	-9.8

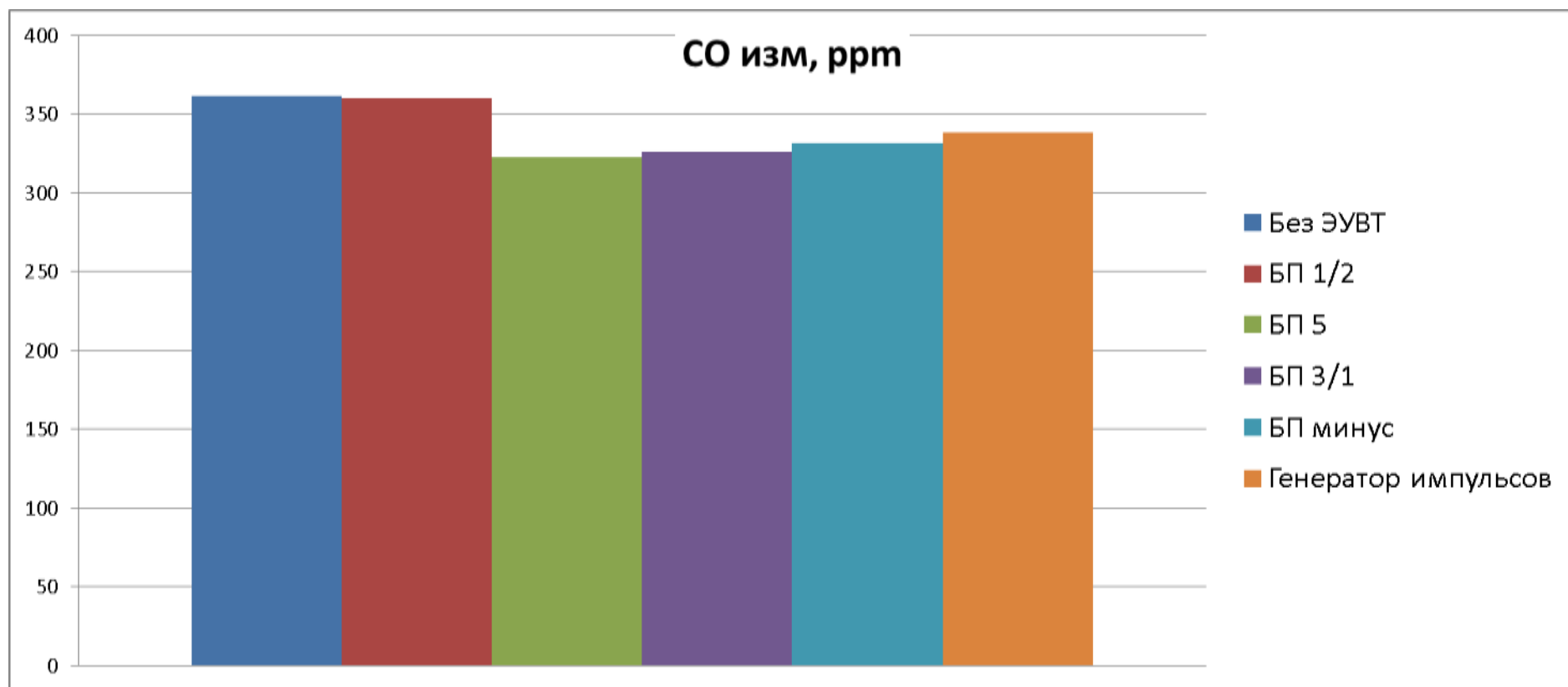


Рисунок 6.50 – Экспериментальные результаты влияния параметров электрического напряжения на электродах форсуночных модулей на эмиссию CO при сгорании керосино-воздушной смеси в пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14 (режим малого газа)

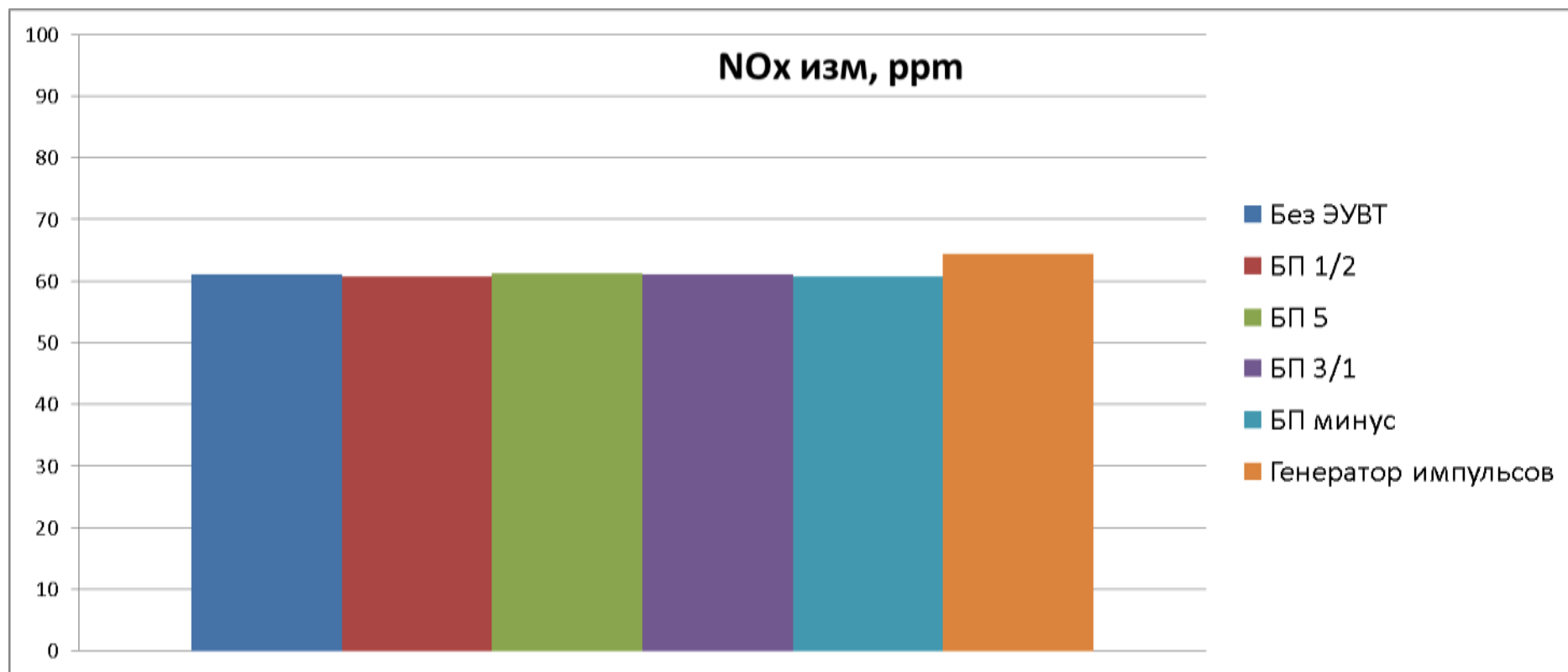


Рисунок 6.51 – Экспериментальные результаты влияния параметров электрического напряжения на электродах форсуночных модулей на эмиссию NOx при сгорании керосино-воздушной смеси в пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14 (режим малого газа)

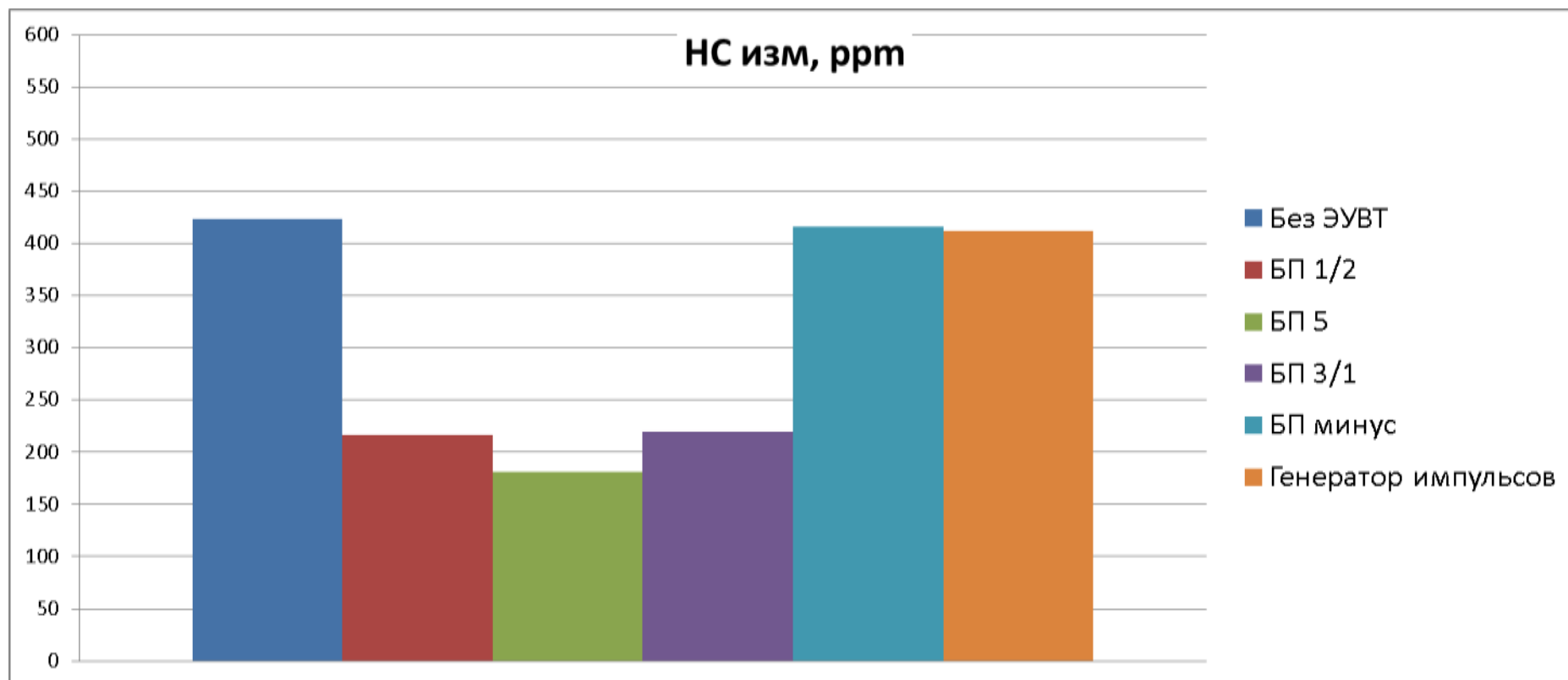


Рисунок 6.52 – Экспериментальные результаты влияния параметров электрического напряжения на электродах форсуночных модулей на эмиссию НС при сгорании керосино-воздушной смеси в пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного газотурбинного авиационного двигателя типа ПД-14 (режим малого газа)

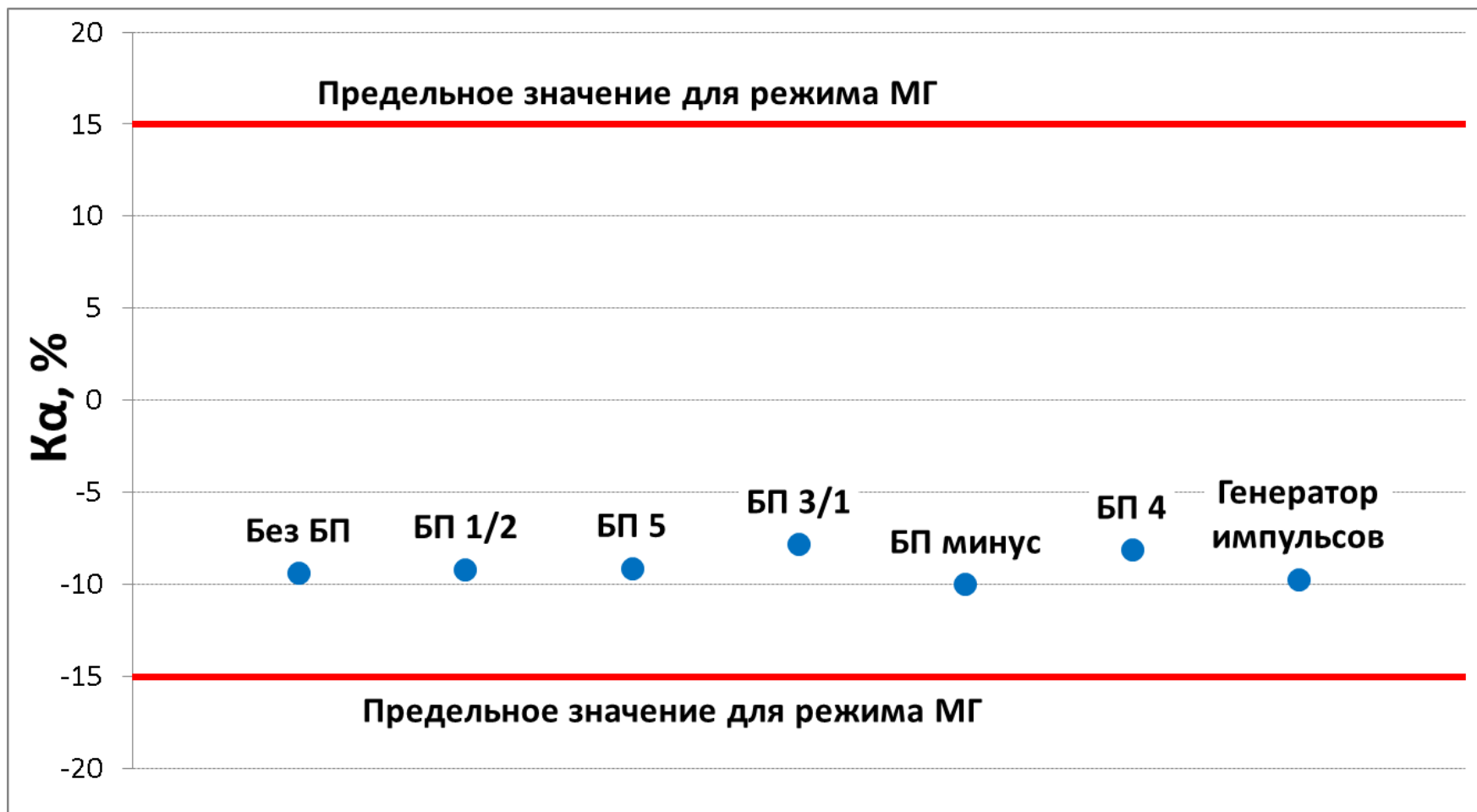


Рисунок 6.53 – Значение $K\alpha$ при огневых испытаниях в АО «ОДК –Авиадвигатель» на режиме малого газа форсуночных модулей при различных параметрах электрического напряжения на электродах базового ЭУВТ-3 (разные варианты БП), включенного в цепь питания пневматических форсунок

6.3 Выводы по разделу

1. Предложены базовые математические модели и разработаны методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиационного двигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки с верификацией экспериментом при огневых испытаниях электрокаплеструйных форсуночных модулей.

2. При сравнительном сопоставлении результатов численных расчетов с полученными впервые экспериментальными данными по влиянию электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания углы факела распыла, размеры капель топлива и скорости их движения принимались на основе также впервые полученных экспериментальных данных по соответствующим параметрам распыла [41,6,8,154]. При этом в расчетную модель вводились соответствующие экспериментально снятые для центробежной форсунки углы факела распыла капель керосина, скорости и диаметры капель керосина без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ (база для сравнения), а потом - с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ при прочих одинаковых режимах работы форсунки.

3. Для экспериментально исследованных режимов и для всех вариантов сборок базового ЭУВТ-3 + БП_i значение угла топливного факела $\varphi_{ТФ}$ оказывается больше, чем для «базы». Например, для базового ЭУВТ + БП-5 и перепаде давления по воздуху 3 % при перепаде давления по топливу 1,28 ат угол $\varphi_{ТФ}$ при наличии электрического напряжения на электродах ЭУВТ увеличивается на 36,4 % относительно базы (при отсутствии напряжения на электродах ЭУВТ).

4. В результате выполнения численных расчетов на супер вычислительных комплексах впервые промоделировано (на примере модельной камеры сгорания газотурбинного авиационного двигателя) положительное влияние электрических полей на процессы горения керосино-воздушной смеси с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки. Получены картины распределений скоростей потоков и температуры внутри

модельной камеры сгорания как без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ, так и с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ. Показано, что при электрическом напряжении на электродах ЭУВТ температура горения в КС становится больше относительно случая его отсутствия.

5. Разработаны методики экспериментальных исследований процессов горения в модельной КС на современном лазерно-оптическом оборудовании с использованием электрокаплеструйных форсуночных модулей. Эти форсуночные модули содержат наиболее хорошо зарекомендовавшую (по результатам экспериментальных и теоретических исследований) базовую конструкцию ЭУВТ (ЭУВТ-3) [3,7-9,25,74,156,158,159,162,319] и центробежную топливную форсунку.

6. На современном огневом стенде СГАУ проведены экспериментальные исследования влияния параметров электрического напряжения на электродах ЭУВТ в данных форсуночных модулях на процессы горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя. Используются современные методы исследования и высокоточное компьютеризированное лазерно-оптическое измерительное оборудование.

7. Проведена верификация экспериментом результатов численного моделирования. Подтверждены базовые положения теоретических моделей путем сравнительного анализа полученных результатов численного моделирования с данными экспериментальных испытаний электрокаплеструйных форсуночных модулей.

8. Огневые испытания электрокаплеструйных форсуночных модулей с центробежной топливной форсункой показали, что использование форсуночных модулей:

- повышает среднюю температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы;
- повышает максимальную температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы;

- снижает неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы.

9. Разработаны математические модели и методы численного расчета сопряженного теплообмена в пневматической топливной форсунке (как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14) при двухфазном течении керосино – воздушной смеси.

10. Разработаны методики экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных по влиянию резко неоднородных электрических полей в цепи питания пневматической топливной форсунки на процессы горения керосино-воздушной смеси в реальных камерах сгорания газотурбинных авиадвигателей применительно к авиадвигателю типа ПД-14. При этом электрокаплеструйный форсуночный модуль состоит из базового ЭУВТ, включенного в цепь питания доработанной с позиций динамического конструирования пневматической форсунки.

11. Результаты огневых испытаний таких форсуночных модулей на пятигорелочном отсеке реальной камеры сгорания двигателя ПД-14 в АО «ОДК-Авиадвигатель» показали, что при воздействии на керосин переменного электрического поля с изменяющейся амплитудой и частотой (блок БП-5) на режиме малого газа работы авиадвигателя, происходит:

- уменьшение СО в исходящих продуктах горения на 10,61% по сравнению с базой, когда электрическое напряжение на электродах ЭУВТ отсутствует;
- уменьшение концентрации несгоревших углеводородов НС - на 57,3% по сравнению с базой.

12. Все вышеперечисленное свидетельствует при использовании разработанных электрокаплеструйных форсуночных модулей в авиационных двигателях об улучшении параметров распыла топлива и увеличении полноты сгорания топлива при воздействии электрических полей на топливо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по проведенным исследованиям и разработкам подробно изложены выше по разделам диссертации.

В заключение, обобщая полученные результаты, в представленной работе:

1. Предложена стратегия исследований и разработок электрокаплеструйных форсуночных модулей с электрическими устройствами воздействия на топливо (ЭУВТ), основанная на разработанной технологии Динамического конструирования. Данная технология предусматривает использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау» за счет оптимального выбора взаимосвязанных электрогидродинамических, гидродинамических, конструктивных и электрических параметров. Мировая новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов подтверждены выдачей автору 7 патентов Российской Федерации [16 - 22].

2. Впервые применительно к газотурбинным авиационным двигателям (на примере современного авиадвигателя типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения топливно-воздушной смеси с использованием ЭУВТ и переменных однородных электрических полей с изменяющейся частотой, резко неоднородных постоянных и переменных электрических полей и их совместного использования. Разработаны принципы построения узлов электрокаплеструйных форсуночных модулей с использованием ЭУВТ в гидравлической цепи питания топливной форсунки и в самой форсунке и различных электрических полей.

3. Рассмотрены физико-химические основы воздействия на топливо переменных электрических полей и методы электризации углеводородных топлив. Показано, что электрический заряд капель углеводородных топлив не только уменьшает поверхностное натяжение капель, но и уменьшает диаметры

капель при распыливании топлива. Впервые получена безразмерная формула зависимости поверхностного натяжения капли топлива от величины заряда, хорошо отображающая результаты экспериментов и использованная при дальнейших численных расчетах по распылу топлива и горения топливно-воздушной смеси.

3. Разработаны методы повышения эффективности электризации углеводородных топлив и топливно-воздушных смесей и математические модели электрогидродинамических и электрогазодинамических процессов сообщения униполярного электрического заряда углеводородным топливам при приложении резко неоднородного электрического поля. Проведен анализ физических моделей образования заряда в потоке топлива в резко неоднородном электрическом поле ЭУВТ и предложено для дальнейших численных исследований принять уточненную на базе проведенных экспериментов инжекционную модель.

4. Разработаны численные модели (с учетом уточненной инжекционной модели и полученной формулы влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капли топлива):

- электрогидродинамических процессов образования заряда в резко неоднородном электрическом поле вблизи поверхности электрода типа «игла» и его распространения в закрученном потоке топлива применительно к электрокаплеструйным форсуночным модулям;
- процессов течения двухфазных потоков, позволяющие описывать течения топлива с воздухом и определять характеристики распыла;
- процессов течения газа, распространения и испарения капель, горения и образования вредных веществ в камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя.

5. Разработана численная электрогидродинамическая модель электрокаплеструйного форсуночного модуля, в котором электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки. Проведено (с помощью открытого пакета OpenFOAM и использованием вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности DES и LES) трехмерное численное

моделирование закрученного турбулентного течения керосина как без, так и с учётом электрогидродинамического взаимодействия. Показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение топлива (керосина) является осесимметричным и профили скорости закрученного потока топлива могут быть аппроксимированы гауссовым распределением; течение керосина является нестационарным; за счёт интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки заряда достигает около 80% инжестируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный поток керосина. Проведены исследования влияния расположения игольчатого электрода относительно изолирующей шайбы между цилиндрическими электродами и степени закрутки керосина в форсуночном модуле на количество выносимого заряда закрученным потоком на выходе форсунки и даны рекомендации по оптимизации конструкции электрокаплеструйного форсуночного модуля.

6. Теоретически исследованы процессы сообщения электрического заряда каплям топлива в топливно-воздушной смеси в поле коронного разряда, а также другие способы влияния электрического заряда капель топлива на вязкость и поверхностное натяжение капель. Исследованы динамические характеристики процессов приобретения как отрицательного, так и положительного электрического заряда каплями различных углеводородных топлив в зависимости от их диэлектрической проницаемости, диаметров капель, напряженности электрического поля. На основании полученных результатов исследований сформулированы требования к скорости и параметрам капель углеводородных топлив для обеспечения их максимального заряда в электрическом поле коронного разряда.

7. При численном трехмерном моделировании рассматриваемых нестационарных процессов, характерных для авиационных двигателей, решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей с целью получения наибольшего совпадения результатов суперкомпьютерных вычислений с экспериментальными данными на современном оборудовании.

8. На основании проверенных экспериментом разработанных численных моделей проведены численные исследования влияния конструктивных, электрогидроаэродинамических, гидродинамических, электрических параметров на параметры распыла и горения, обобщены результаты численных исследований, даны рекомендации по выбору и выбраны рациональные параметры форсуночных модулей. Предложены пути дальнейшего совершенствования электрокаплеструйных форсуночных модулей.

9. Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере оптимизированного при различных режимах работы авиадвигателя с этих позиций образца экспериментальной пневматической форсунки для современного авиадвигателя ПД-14 (ЭОФ), как элемента электрокаплеструйного форсуночного модуля.

10. Для верификации экспериментом результатов численного моделирования электрогидродинамических и гидродинамических процессов распыла топлива (керосина) впервые в мировой практике изготовлены (на основании результатов численных 3D CFD расчетов) экспериментальные образцы электрокаплеструйных форсуночных модулей (электропневматической форсунки) с электродной системой ЭУВТ внутри форсунки (ЭПФ) с организацией резко неоднородных электрических полей, имеющих идентичные параметры по расходу топлива и воздуха, а также внешние установочные параметры как и в ЭОФ. Показано, что для одновременного обеспечения жаропрочности и диэлектрических свойств (применительно к условиям работы авиадвигателей) в качестве изолирующего материала соответствующих деталей ЭПФ целесообразно выбрать корундоциркониевую керамику, состоящую из оксида алюминия Al_2O_3 – 95% и диоксида циркония ZrO_2 – 5%. Впервые разработаны технология получения и обработки изоляционных керамических деталей ЭПФ из корундоциркониевой керамики. Разработанные технологии представляют самостоятельный научный и практический интерес не только для авиадвигателестроения, но и для других отраслей.

11. В рамках рассматриваемой проблемы разработан, теоретически

исследован с верификацией экспериментом и обобщен целый ряд принципиально новых электрокаплеструйных методов распыла топлива, горения топливно-воздушной смеси в камерах сгорания авиадвигателей. Последнее в сочетании с разработанными численными моделями рассматриваемых процессов и основными полученными (как правило, впервые) теоретическими и экспериментальными результатами представляет весьма универсальный аппарат теоретического и практического анализа разработанного нового класса форсуночных модулей и электрокаплеструйных технологий и определяет дальнейшие пути целенаправленного поиска частных электрокаплеструйных методов (см, например, [19, 10, 23, 27]), а также детальные дальнейшие исследования влияния параметров электрических полей на распыл топлива и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях. При этом новыми являются большинство результатов, поскольку большинство методов и электрокаплеструйных форсуночных модулей применительно к авиационным двигателям исследовано и разработано впервые. Новизна и полезность разработанных способов улучшения распыла топлива, горения топливно-воздушной смеси подтверждена 6 патентами РФ.

12. Разработаны теоретические модели и методы численного расчета с использованием суперкомпьютерных вычислений с верификацией экспериментом рассматриваемых процессов, позволяющие выбрать рациональные соотношения между электрическими, гидро(газо)динамическими и конструктивными параметрами электрокаплеструйных форсуночных модулей.

13. Предложены обобщенные методологические принципы разработки конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей, позволяющие выполнить электрогидро(газо)динамическую их часть в модульно-блочном исполнении, упорядочить и идейно объединить теоретический анализ влияния основных электрических и конструктивных параметров на статические и динамические характеристики рассматриваемых устройств. Сведена к минимальному базовому набору конструктивных и электрических блоков реализация наиболее перспективных принципов построения

электрокаплеструйных форсуночных модулей, что позволяет выполнить электрокаплеструйных форсуночные модули в модульно-блочном исполнении.

14. Совокупность полученных результатов составляет научные основы расчета и современного конструирования эффективных электрокаплеструйных форсуночных модулей.

15. При впервые проведенных огневых испытаниях по разработанным методикам влияния конструктивных и электрических параметров ЭУВТ на распыл керосина и горение керосино-воздушной смеси на современном оборудовании в составе разработанных конструкций электрокаплеструйных форсуночных модулей как на модельных, так и на реальных камерах сгорания авиадвигателей экспериментально подтверждено, что использование электрических полей в форсуночных модулях позволяет улучшить характеристики распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси в камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя, что приводит к снижению эмиссии вредных веществ:

- средние диаметры капель при наличии электрического поля оказываются меньше, чем для «базы» на 8 %;

- установлено, что с увеличением перепада давления по воздуху $\Delta \bar{p}_B$, угол топливного факела $\varphi_{T\Phi}$ при наличии электрического напряжения на электродах электрокаплеструйного форсуночного модуля увеличивается (до 36,4 %), причём, чем больше перепад давления по топливу Δp_T , тем менее значительно это увеличение. Значение угла топливного факела $\varphi_{T\Phi}$ оказывается больше, чем для «базы» (без электрического напряжения на электродах базового ЭУВТ).

- повышается среднюю температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы;

- повышает максимальную температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы;

- снижается неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы;

– показано, что при впервые проведенных огневых испытаниях на пятигорелочном отсеке реальной камеры сгорания двигателя ПД-14 в АО «ОДК-Авиадвигатель» при воздействии на керосин переменного электрического поля с изменяющейся амплитудой и частотой на режиме малого газа работы авиадвигателя, происходит уменьшение СО в исходящих продуктах горения на 10,61% по сравнению с форсункой без электрического поля; уменьшение концентрации несгоревших углеводородов НС - на 57,3%. Все это свидетельствует об улучшении параметров распыла топлива и увеличении полноты сгорания топлива;

– показано, что разработанные электрокаплеструйные форсуночные модули при подаче электрического напряжения на электроды обеспечивают среднезаутеровский диаметр капли керосино-воздушного аэрозоля меньше 35 микрон при работе авиационного газотурбинного двигателя в реальных условиях.

Причем эти данные экспериментов получены впервые в мире применительно к авиационным газотурбинным двигателям.

16. Предложенные методы расчета и проектирования форсуночных модулей использованы в АО «ОДК-Авиадвигатель» при разработке конструкторской документации, разработке и выпуска экспериментальных серий образцов форсунок (как элементов форсуночных модулей) и электропневматических форсунок (электрокаплеструйных форсуночных модулей) с дальнейшей верификацией экспериментом.

17. Подтверждены базовые положения теоретических моделей путем сравнительного анализа результатов численных расчетов и экспериментов, проведенных на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании.

Основные результаты получены лично автором или с его непосредственным участием.

Научная ценность предложенных электрокаплеструйных методов и технологий определяется их общностью и достоверностью, что доказано сравнительной оценкой результатов теоретических и экспериментальных исследований на реальных авиационных двигателях.

На основании выполненных исследований достигнуто главное – теоретически получено и экспериментально подтверждено, что при использовании электрических полей в электрокаплеструйных форсуночных модулях авиационных двигателей улучшаются параметры распыла керосина, и сгорания керосино-воздушной смеси. Области применения полученных результатов: в различных типах двигателей и в наземных силовых установках с перспективой практического внедрения результатов диссертации, например, в современных авиационных двигателях типа ПД-14 или/и типа ПС-90А, ПД-35.

Таким образом, в данной диссертационной работе решена актуальная научная проблема более эффективного управления дисперсностью топлив, процессами образования, воспламенения и горения топливно-воздушных смесей., имеющая важное хозяйственное значение, разработки теории и методов численного моделирования и конструирования на базе суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом эффективных узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей) авиационных двигателей выбором их рациональных электрогидродинамических, гидродинамических, электрических, конструктивных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей. Предложены научно обоснованные технические и технологические решения при реализации разработанных новых электрокаплеструйных форсуночных модулей и технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolodyazhny D. Yu. Numerical simulation of the flow in the fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field / V. S. Nagorniy, A. A. Smirnovsky, A. S. Tchernysheff, D. Yu. Kolodyazhny. // *Procedia Computer Science*, volume 51. 2015. – P. 1219-1228.
2. Колодяжный Д.Ю. Перенос заряда в резко неоднородном электрическом поле закрученным потоком жидкости с минимальным гидравлическим сопротивлением / В.С. Нагорный, А.А. Смирновский, А.С. Чернышев, Д.Ю. Колодяжный. // *Письма в журнал технической физики*. 2015. – т. 41, вып. 17. С. 94-102.
3. Колодяжный Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на параметры сгорания керосиновоздушной смеси / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // *Известия ВУЗов. Авиационная техника*. 2015. – № 4. С. 73 – 76.
4. Колодяжный Д.Ю. Сообщение электрического заряда каплям углеводородных топлив в резко неоднородном электрическом поле в форсуночных модулях / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // *Известия ВУЗов. Авиационная техника* . 2016. – № 3. С. 100 – 105.
5. Колодяжный Д.Ю. Методика численного моделирования процесса распада жидкой пленки в пневматической форсунке авиадвигателя / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов, В.Я. Модорский. // *Известия ВУЗов. Авиационная техника* . 2017. – № 1. С. – 91-97.
6. Kolodjachniy D.Ju. Influence of an electric field on dispersion of fuel by an atomizer of an aircraft engine / D.Ju. Kolodjachniy, V.S. Nagorniy. // *Nonequilibrium processes in physics and chemistry*. Vol. 1. Plasma, clusters, and atmosphere /. – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – pp. 223-231.
7. Kolodjashnyj D.Ju. Computational modelling of conjugate heat transfer in the fuel atomizer with two-phase flow of fuel - air mixture / I.B. Vojnov, V.S. Nagorniy, D.Ju. Kolodjashnyj. // *Nonequilibrium processes in physics and*

- chemistry. Vol. 2. Combustion and Detonation/. – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – pp. 181-185.
8. Колодяжный Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на скорость продуктов сгорания керосино-воздушной смеси / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Вестник Московского авиационного института. 2016. – Т. 23. № 1. С. 56 – 66.
 9. Колодяжный Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на химический состав продуктов сгорания керосиновоздушной смеси / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // Вестник Московского авиационного института. 2015. – Т. 22. № 4. С. 42-49.
 10. Колодяжный Д.Ю. Исследование параметров структурированных наночастицами серебра рабочих жидкостей электрокаплеструйных технологий / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Наноинженерия. 2014. – № 1(31). С. 20-23.
 11. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование электрогидродинамических процессов воздействия резко неоднородных электрических полей на топливо / В.С. Нагорный, И.Б. Войнов, Д.Ю. Колодяжный. // Современное машиностроение: наука и образование (ММЕСЕ-2016). Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. 30.05. – 01.07.2016 г. СПб.: Изд-во Политехнического университета. С. 1357-1366.
 12. Колодяжный Д.Ю. Влияние электрического напряжения на вязкость топлива. / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Системный анализ в проектировании и управлении. Научные труды XX Международной научно-практической конференции. 29.06. – 30.06.2016 г. СПб.: Изд-во Политехнического университета. ч. 1. С. 369-379.
 13. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование электрогидродинамических процессов в электрических устройствах воздействия на топливо / В.С. Нагорный, И.Б. Войнов, Д.Ю. Колодяжный. // Системный анализ в проектировании и управлении. Научные труды XX Международной

- научно-практической конференции. 29.06. – 30.06.2016 г. СПб.: Изд-во Политехнического университета. ч. 1. С. 361-368.
14. Kolodyazhny D.Yu. Numerical simulation of the flow in the fuel injector in the sharply inhomogeneous electric field / V.S. Nagorniy, A.A. Smirnovsky, A.S. Tchernysheff, D.Yu. Kolodyazhny. // International Conference on Computational Science, ICCS- 2015. June 1 – 3, 2015, Reykjavik, Iceland. 2015. – Abstracts. P. 178.
 15. Колодяжный Д.Ю. Исследование процесса переноса зарядов при течении закрученного потока диэлектрической жидкости в резко неоднородном поле./ В.С. Нагорный, А.А. Смирновский, А.С. Чернышев, Д.Ю. Колодяжный // Сборник докладов XI Международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» 29.06.-03.07.2015г., Петергоф 2015. – С. 94-97.
 16. Пат. № 2582376 (РФ). /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю. Способ повышения эффективности распыла топлива. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Опубликовано: 27.04.2016. Бюл. № 12.
 17. Пат. № 2562505 (РФ). /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Марчуков Е.Ю., Фёдоров С.А., Пшелко Н.С. Способ повышения эффективности сгорания углеводородного топлива. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Опубликовано: 10.09.2015 Бюл. № 25.
 18. Пат. № 2571990 (РФ). /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю. Способ повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолёта. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Опубликовано: 27.12.2015. Бюл. № 36.
 19. Пат. № 2545562 (РФ). /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Марчуков Е.Ю., Мухин А.Н. Способ формирования радиопоглощающих топологий на носителях. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Опубликовано: 10.04.2015 Бюл. № 10.

20. Пат. № 2615618 (РФ). /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Сипатов А.М., Хрящиков М.С., Семаков Г.Н. Топливная форсунка газотурбинного двигателя. Заявитель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Опубликовано: 05.04.2017 Бюл. № 10.
21. Пат. № 2634649 (РФ). / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Сипатов А.М., Хрящиков М.С., Семаков Г.Н. Топливная форсунка. Заявитель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Опубликовано: 02.11.2017 Бюл. № 31.
22. Пат. № 2636947 (РФ). / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю. Топливная форсунка авиационного двигателя. Заявитель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Опубликовано: 29.11.2017 Бюл. № 34.
23. Колодяжный Д.Ю. Параметры наночастиц серебра в рабочих жидкостях электрокаплеструйных технологий / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Материалы XX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». М.: МИЭМ. 2013. – С. 149-154.
24. Колодяжный Д.Ю. Методика экспериментальных исследований процессов распыла топлива на стенде СГАУ / А.А. Диденко, Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // Системный анализ в проектировании и управлении, Научные труды XVIII Международной научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 01-03 июля 2014 г., ч. 2., 2014. –121-123.
25. Колодяжный Д.Ю. Повышение эффективности сгорания углеводородных топлив / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Материалы Международного форума «Крым Hi-Tech- 2014», 25-27.09.2014, г. Севастополь. 2014. – С. 246-248.
26. Колодяжный Д.Ю. Естественнонаучные основы повышения эффективности горения углеводородных топлив при их электризации / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // В кн. «Системный анализ в

- проектировании и управлении», ч. 2. Научные труды XVII Международной научно-практической конференции. Издательство Политехнического университета, СПб.: 2013. – 136- 138.
27. Колодяжный Д.Ю. Физика получения и управления от микро-ЭВМ потоками монодисперсных капель / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах. Материалы XVI Международной научной конференции. 19-22.08.2013 г. Николаев, Украина. Николаев: 2013. – С. 87-90.
28. Kolodyazhny D.Yu. Modeling Technique for the Process / V.Ya. Modorskii, A.M. Sipatov, A.V. Babushkina, D.Yu Kolodyazhny and V.S. Nagorny. // International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2016). AIP Conference Proceedings, 2016. – P. 030109-1 – 030109-7.
29. Колодяжный Д.Ю. Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, М.М. Радкевич, Т.А. Цимко. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. – № 2 (195). – С. 194-201.
30. Колодяжный Д.Ю. Управление процессом формообразования стружки при обработке труднообрабатываемых материалов и сплавов / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный. // Металлообработка. 2014. – № 4 (82). С. 2-6.
31. Колодяжный Д.Ю. Определение погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых сплавов в авиадвигателестроении / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, Е.О. Ларионов. // Современное машиностроение: наука и образование (ММЕSE-2016). Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. 30.05. – 01.07.2016г. СПб.:Изд-во Политехнического университета. 2016. – С. 936-946.
32. Колодяжный Д.Ю. Нормирование точности в машиностроении. / Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, С.А. Любомудров. – Учебное

- пособие. Часть 1 СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2014. – 197 с.
33. Колодяжный Д.Ю. Нормирование точности в машиностроении./ Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, С.А. Любомудров. – Учебное пособие. Часть 2 СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2014. – 197с.
34. Колодяжный Д.Ю. Нормирование точности и технические измерения. / Э.Л. Жуков, Д.Ю. Колодяжный, С.А. Любомудров. – Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2012. – Сер. Приоритетный национальный проект "Образование". Национальный исследовательский университет.
35. Колодяжный Д.Ю. Устойчивость и надежность процессов обработки материалов резанием / С.Л. Мурашкин, Э.Л. Жуков, Д.Ю. Колодяжный. // В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы IX Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. СПб. СПбГПУ. 2005. – С. 249-250.
36. Колодяжный Д.Ю. Устойчивость движения технологических систем при прерывистой обработке резанием / Д.Ю. Колодяжный и др. // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. – № 2. С. 91-97.
37. Колодяжный Д. Ю. Функциональный анализ периодических возмущений при прерывистом резании / Д.Ю. Колодяжный. // Двигатель. 2011. – № 6 (78). С. 20-21.
38. Колодяжный Д.Ю. Определение возможности использования резко неоднородных электрических полей для повышения эффективности горения в камерах сгорания турбореактивных двигателей / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, С.А. Федоров. // Отчет о научно-исследовательской работе (Договор с ОКБ им. А. Люльки № 140403304). СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2013. – 104 с.

39. Колодяжный Д.Ю. Обоснование и выбор направления исследований по разработке форсуночных модулей / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов и др. // Отчет о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014г. № 14.577.21.0087). СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2014. – 327 с.
40. Колодяжный Д.Ю. Теоретическое исследование процессов воздействия электрических полей на топливо, процессы распыла топлив в разрабатываемых форсуночных модулях. Определение облика экспериментального образца форсунки с оптимизированными параметрами распыла / Д.Ю., Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов и др. // Отчет о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014 г № 14.577.21.0087). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2015. – 412 с.
41. Колодяжный Д.Ю. Разработка конструкций форсуночных модулей и экспериментальное исследование электрических устройств воздействия на топливо / Д.Ю., Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов и др. // Отчет о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014 г № 14.577.21.0087). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2015. – 427 с.
42. Колодяжный Д.Ю. Разработка и изготовление форсуночных модулей / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов и др. // Отчет о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014 г № 14.577.21.0087). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. – 144 с.
43. Авиационные правила, часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. – М.: ОАО «Авиаиздат». 2004. – 43 с.

44. Авиационные правила, часть 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. – М.: ОАО «Авиаиздат» .2003.– 84 с.
45. Охрана окружающей среды. Приложение 16 к конвенции о Международной гражданской авиации. Том II. Эмиссия авиационных двигателей. – Montreal, Quebec, Canada: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 118 с.
46. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели /А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – Пермь.: Изд-во ОАО «Авиадвигатель». 2006 . – 1202 с.
47. Сипатов А.М. Оптимизация конструкции пневматического распыливающего устройства на основе методов трехмерного моделирования / А.М. Сипатов, С.А. Карабасов, Л.Ю. Гомзилов, Т.В. Абрамчук, Г.Н. Семаков. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. – №1. С. 57-62.
48. Бабкин В.И. Развитие авиационных газотурбинных двигателей и создание уникальных технологий/ В.И. Бабкин, М.М. Цховребов, В.И. Солонин, А.И. Ланшин.: «Двигатель». 2013. – №2 (86). С. 2-7.
49. Пат. № 2011881 (РФ), МПК F02M 27/04. Устройство для обработки топлива в дизельном двигателе внутреннего сгорания / Захватов Е.М., Лыженков В.Н. Оpubл. в 1994, БИ №8.
50. Пат. № 2032107 (РФ), МПК F02M 27/04. Способ электрической обработки жидкого топлива и активатор для жидкого топлива / Дарбинян Р.В. Оpubл. в 1995, БИ №9.
51. Пат. № 2093699 (РФ), МПК F02M 27/04. Устройство для обработки жидких и / или газообразных сред / Данилов В.Н., Омеляненко М.Н., Ковальчук Я.М. и др. Оpubл. в 1997, БИ №29.
52. Пат. № 2126094 (РФ), МПК F02M 27/04. Способ интенсификации работы двигателя внутреннего сгорания /Дудышев В.Д. Оpubл. 10.02. 1999.

53. Пат. № 2078977 (РФ), МПК F02M 27/04. Устройство для обработки воздуха в двигателе внутреннего сгорания / Блинков Е.Л., Кейт З.Р., Ляпин А.Г. и др. . Оpubл. 08.02.1994.
54. Пат. № 2469205 (РФ), МПК F02M 27/04. Система распыления топлива при содействии электрического поля и способы использования / Качанович Э., Хуан Кэ, Тао Р., Кхилнаней .
55. Пат. № 2156879 (РФ), МПК F02M. Устройство для обработки топлива / Лыженков В.Н., Хохонин А.А. Оpubл. 27.09.2000.
56. Пат. № 2419030 (РФ), МПК F23D 11/32, F23D 11/38. Топливная форсунка / Уилбрэхэм Найджел. Оpubл. 20.05.2011.
57. Пат. № 2038506 (РФ), МПК F02M 27/04. Способ обработки топлива / Федотов А.Д., Баканов А.А., Шабордин А.В.. Оpubл. 18.07.1995.
58. Пат. № 2184868 (РФ), МПК F02M 27/04. Устройство для обработки топлива в двигателе внутреннего сгорания / Евсихеев Б.В., Соин Ю.В. Оpubл. 01.17. 2001.
59. Пат. № 2190118 (РФ), МПК F02M 27/00. Устройства для обработки воздуха, топлива или горючей смеси катализаторами, электрическими средствами, магнитным полем, лучами, звуковыми волнами и т.п. / Свияженинов Е.Д. Оpubл. 27.09. 2002.
60. Пат. № 2377434 (РФ), МПК F02M27/02, F02M27/04 , F02B51/02. Устройство для электрокаталитической обработки топлива / Евграфов И.В. Оpubл. 27.12. 2009.
61. Пат. № 2135814 (РФ), МПК F02M 27/04. Способ интенсификации работы двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления / Дудышев В.Д., Завьялов С.Ю. Оpubл. 27.08.1999.
62. Пат. № 2079786 РФ, МПК F23D14/24. Способ интенсификации горения факела пламени в топке котельной установки / Дудышев В.Д. Оpubл. 20.05.1997.
63. Пат. № 2125682 (РФ), МПК F23N5/00, F23G5/00. Способ интенсификации и управления пламенем / Дудышев В.Д. Оpubл. 27.01.1999.

64. Пат. № 2175074 (РФ), МПК F01N3/08. Способ электроогневой очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления / Дудышев В.Д. Оpubл. 27.03.1999.
65. Мурамович В.Г. Теоретико-методические основы молекулярной модификации углеводородного топлива для транспортных средств электрическими полями. /Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб.: 2013. – 18 с.
66. Пат. № 2215172 (РФ), МПК F02M 27/04. Устройство для обработки топлива / Захватов Е.М., Абакаров А.Н., Мамченко В.М., Туев С.В. Оpubл. 27.10.2003.
67. Пат. № 2172893 (РФ), МПК F23D11/12, F23C11/00, B05B1/34, Форсунка / Белковский Л.В., Жуков В.Г., Левин Е.И., Попсуй В.М. Оpubл. 27.08.2001.
68. Пат. № 2322608 (РФ), МПК F02M 27/04, F02M 25/00. Способ разработки углеводородного сырья и устройство для его осуществления / Захватов Е.М., Касторных С.В., Денисов С.Г. и др. Оpubл. 20.04.2008.
69. Андреев Е.И. Основы естественной энергетики. - СПб.: изд-во «Невская жемчужина». 2004. – 584 с.
70. Европейский патент EP № 1139021. Оpubл. 04. 10. 2001.
71. Пат. № 2396454 РФ, МПК F02M 27/04. Устройство для обработки топлива в двигателе внутреннего сгорания / Бородин В.И. Оpubл. 10.08.2010.
72. Заявка № 2010138760 (РФ), МПК F02M 27/04. Способ изменения физико-химических свойств жидких углеводородных топлив электрическим полем и устройство для его осуществления / Анисимов П.Ф., Мурамович В.Г., Туев С.В. и др. Оpubл. 27.03.2012.
73. Kolodjachniy D.Ju. Effect of electric field on the atomization of fuel by the nozzle of an aircraft engine/ D.Ju. Kolodjachniy, V.S. Nagorniy. // 7th International Symposium on Non-Equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (NEPCAP 2016). October 2 7, 2016. – Sochi. Russis. Technical Program. – P. 20.

74. Kolodjazhnyj D.Ju. Computational modelling of conjugate heat transfer in the fuel atomizer with two-phase flow of fuel - air mixture/ I.B. Vojnov, D.Ju. Kolodjazhnyj, V.S. Nagorniy. // 7th International Symposium on Non-Equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (NEPCAP 2016). October 2 – 7, 2016. – Sochi. Russia. Technical Program. – P. 20.
75. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распыливания жидкостей и интенсификация процессов сгорания жидких топлив в тепловых двигателях. Автореф. дис. докт. тех. наук. М.: МАДИ. 1977. – 48 с.
76. Мурамович В.Г. Увеличение энергоотдачи углеводородного топлива / В.Г. Мурамович, О.В. Белый, П.Ф. Анисимов, С.В. Туев. – СПб: Издательство ООО «Ю-Питер». 2012. – 116 с.
77. Самарский А. А. Вычислительный эксперимент в задачах технологии // Вестн. АН СССР. 1984. – № 11. С. 17-29.
78. Christopher T. NearFieldBehavior of a Liquid Jet in a Crossflow / T. Christopher, G. Brown and Vincent, Mc Donell. // ILASS Americas. 2006.
79. Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. – Л.: Энергоатомиздат. 1990. – 431 с.
80. Панченко Г.М. Теория вязкости жидкостей. – Л.: 1947.
81. Nagorniy V.S. Engineering Principles of New Electrohydrodynamic Converters of Automatic Systems' Signals with Controlling of Space Charge's Value and Distribution in Dielectric Liquid Volumes, Flows and Jets // International Symposium on Electrical Insulating Materials 2005 (June 5 - 9, 2005. Japan Kitakyushu. 2005. – P. 123 – 126).
82. Nagorniy V.S. Electrophysical Principles of Electrogas –and electrohydrodynamic Control of Gas and dielectric Liquid Jets and Flows // 15th IEEE International Conference on Dielectric Liquids (26 June – 1 July, 2005. Portugal Coimbra. 2005. – P. 197 – 199).

83. Nagorniy V.S. Studies of electric charge transfer to dielectric fluid drops in a corona discharge field // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Allerton Press, Inc. distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC. 2006. – No. 2. P. 12-18.
84. Nagorniy V.S. Electrophysical principles of electrodynamic conversion of electrical signals into pneumatic ones by turbulization of gas jets by unipolar ion flows / V.S. Nagorniy, I.V. Nagorniy. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Allerton Press, Inc. distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC. 2007. –Vol. 43, No. 3. P. 187-193.
85. Nagorniy V.S Initial Strength of Electric Field of Corona Discharge With Small Interelectrode Gaps in EHG Converters // IEEE International Conference on Dielectric Liquids 2008 (ICDL – 2008. June 30 th - July 4 th. France Poitiers. 2008. – P. 100-102).
86. Nagorniy V.S. Limitations of EHD Control Flows and Jets Using Corona Discharges in Gas / V.S. Nagorniy, I.V. Nagorniy. // IEEE International Conference on Dielectric Liquids 2008 (ICDL – 2008. June 30 th - July 4 th. France Poitiers. 2008. – P. 97-99).
87. Нагорный В.С. Исследование процессов сообщения электрического заряда монодисперсному потоку капель углеводородных топлив при их эмиссии в электрическом поле (обзор) // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. – № 3. С. 27-35.
88. Нагорный В.С. Электрофлюидные преобразователи. – Л.: Судостроение. 1987. – 251 с.
89. Нагорный В.С. Преобразователи малых давлений и перепадов давлений в электрический сигнал с электрогидродинамической компенсацией по давлению / В.С. Нагорный, И.В. Нагорный. – СПб.: Издательство СПбГПУ. 2011. – 223 с.
90. Нагорный В.С. Электрокаплеструйные регистрирующие устройства. Л.: Машиностроение. 1988. – 269 с.

91. Денисов А.А. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов, В.С. Нагорный. – Л.: Машиностроение. 1979. – 288 с.
92. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распыливания / А.У. Салимов, М.Г. Балабеков, А.М. Багдасаров. – Ташкент.: Фан, 1968. – 109с.
93. Асакава Г. Физические методы интенсификации процессов горения. В сб.: Вопросы горения. – М.: 1963. – С. 419 - 426.
94. Ревзин М.С. О влиянии электрического поля на испарение бензина. – Тр./ ЦНИТА. 1974. – Вып. 61. – С. 65-67.
95. Викторов В.Н. Влияние предварительной обработки топлив электрическим полем на скорость горения / В.Н. Викторов, М.Г. Нефедова, В.А. Попов. – Тр. Н.-И. энерг. ин-т им.Г.М.Кржижановского. 1975. – Вып. 36. – С. 142-157.
96. Ревзин И.С. Экспериментальное исследование распада вертикальной струи жидкости в переменном электрическом поле. – Известия вузов. Энергетика. 1974. – № 5. С. 104-107.
97. Ревзин И.С. Экспериментальное исследование влияния переменного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей. – Электронная обработка материалов. 1975. – № 3. С. 28-30.
98. Копейкина Э.К. Влияние электрического поля на поверхностное натяжение неполярных жидкостей. – Электронная обработка материалов. 1970. – № 4. С. 57-59.
99. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распыливания жидкостей и интенсификации процессов сгорания жидких топлив в тепловых двигателях. – Дис.докт.техн.наук. – Ташкент.: 1978. – 365с.
100. Акбаров М.М. Исследование процессов испарения и высоко-температурного воспламенения автомобильных топлив при искусственной электризации. – Дис. канд.техн.наук – Ташкент.: 1972. – 146с.

101. Болога М.К. Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля. / М.К., Болога, В.М. Руденко. //– Электронная обработка материалов. 1975. – № 3. С. 37-40.
102. Злотин Г.Н. Влияние типа и регулировок системы зажигания на продолжительность и цикловую нестабильность первой фазы процесса сгорания в карбюраторном двигателе / Г.Н. Злотин, З.Б. Малов, В.В. Староверов. // Тр. Волгогр. политех. ин-т. Рабочие процессы в поршневых ДВС. 1979. – С. 3-12.
103. Бабой Н.Ф. Воздействие электрических полей на теплообмен в жидкостях и газах / Н.Ф. Бабой, М.К. Болога, К.Н. Семенов. // Электронная обработка материалов. 1965. – № I. С. 57-71.
104. Степанов Е.М. Ионизация в пламени и электрическое поле. / Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков. – М.: Металлургия. 1968. – 312с.
105. Senfleben H. Zur Frage der Einwirkung elektrischer Felder auf den Wärmeübergang in Gasen / H. Senfleben, H. Gladisch. // DIE Naturwissenschaften. Begründet von A. Berliner und C. Thesing, 1947. – Jg. 34, N. 6. – S. 187 – 188.
106. Чхеидзе В.Д. Интенсификация процесса горения электромагнитными методами в тракторных и автомобильных карбюраторных двигателях. – Дис. канд. техн. наук. – Тбилиси.: 1968. – 145с.
107. Морев В. Поршень или газовая турбина. – За рулем. 1963. – № 10. С. 4.
108. Ревзин И.С. Безмоторное исследование влияния переменного электрического поля на смесеобразование во впускной системе двигателя. – Автомобильная промышленность. 1980. – № 1. С. 5-7.
109. Майоров Н.И. Предварительная обработка топливовоздушной смеси электрическим полем Тр./ Н.-И. энерг. ин-т им. Г.М.Кржижановского. 1975. – Вып.36. – С. 158-167.
110. Рубец Д.А. Смесеобразование в автомобильных двигателях при переменных режимах. – М.: Машгиз. 1948. – 150с.

111. Загрязькин Н.Н. Многоэлектродная свеча зажигания с предварительной ионизацией искрового промежутка / Н.Н. Загрязькин, Г.М. Мещеряков. // Тр.: Институт двигателей АН СССР. 1962. – Вып.6. С. 102-109.
112. Загрязькин Н.Н. Предварительно ионизированный искровой разряд для поджигания горючих смесей / Н.Н. Загрязькин, Г.М. Мещеряков. // Автомобильная промышленность. 1963. – № 7. С. 19-21.
113. Lewis B. The effect of an electric field on the flame temperature of combustible gas mixtures / B. Lewis, C.D. Kreutz. // Journal American Chemical Society. 1933. – Vol. 55, No 3. P. 934-938.
114. Semenov N. The Mechanism of the Upper Limit of Inflammation of Electrolytic Gas Mixture / N. Semenov, A. Nalbandjan, Eubowizky. // Transactions of the Faraday Society. 1933. – Vol. 29, Part 9. – P. 606 - 611.
115. Nalbandjan A. The Combustion of H_2 at Room Temperature in the Presence of Oxygen Atoms. - Academy of Sciences of the USSR. 1935. – Vol. 1, No. 3. P. 305-311.
116. Fitzgerald Dennis J. Pulsed Plasma ignitor for internal combustion engines. – SAE Prepr. 1976. – No 760764. 6 p.
117. Броне Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. Пер. с англ. – М.: Машиностроение. 1968. – 248 с.
118. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности (свободные радикалы и цепные реакции). - 2-е изд. перер. и доп. – М.: Издательство АН СССР. 1958. – 686 с.
119. Клейманов Н.А. Окисление метана атомами кислорода, образующимися при термическом распаде озона./ Н.А. Клейманов и др. // Журнал физической химии. 1956. – Т.30. Вып.4. С.794-797.
120. Звонов В.А. Влияние на рабочий процесс ДВС активирования топлива внешними физическими воздействиями / В.А. Звонов, Н. Макаров. // Двигатели внутреннего сгорания. 2008. – № 2. С.112-121.

121. Каменецкая С.А. Влияние озона на воспламенение углеводородов / С.А. Каменецкая, Н.А. Славинская, С.Я. Пшежицкий. // В кн.: Кинетика и распространение пламени. – М., АН СССР. 1959. – С. 33-42.
122. Казанцев Л.И. Влияние озона на воспламенение дизельного топлива / Л.И. Казанцев, А.А. Сидоров, С.А. Калашников. // В кн.: Материалы XII научно-технической конференции НИИВТА. – Новосибирск.: 1969. – С. 239-241.
123. Гегузин Я.Е. Капля. – М.Наука. 1973. – 160с.
124. National research development corporation. **Патент** 965451 (**Англия**) / Bending Wood Division. Опубликовано: 1964.
125. **Пат. №** 124525 (США) Ozone generator. **Патент №** 3124525 (США) / John Remonte. Опубликовано: 10 March 1964 No 2.
126. **Пат. №** 1270521 (**Франция**) Dispositif permettant de modifier les conditions de combustion d'un melange d'hydro- carbures: / Blahchon (E., M., J.) et Langlais (E.), rep. par Armengand Aine. Опубликовано: 1er Septembre 1961 No 35.
127. Oxygen enricher for combustion engines: **Патент** 3177633 **США** / Lee L. Medonald. Опубликовано: 13 April 1965 No 2.
128. **Пат. №** 763831 (**Бельгия**) Dispositif electronique pour l'amelioration de la combustion et/ou la reduction de la teneur en composes nocifs des gazs d'echappement des mote- urs a combustion interne: / Rostislaff Poroff. Опубликовано: 1976 No 6.
129. Dispositif pour ameliorer la combustion d*un carburant dans l'air: **Заявка** 2284046 **Франция** / Pру Gabriel, De- caudin Pierre. Опубликовано: 7 Mai 1976 No 19.
130. Equipment pour moteur a combustion interne avec generaterur d*ozone: **Заявка** 2298702 **Франция** / GIERAP, rep. par Beau de Lomenie. Опубликовано: 24 Septembre 1976 No 39.
131. **Пат. №** 590405 (**Швейцария**) Equipment pour moteur a combustion interne: **Патент** 590405 **Швейцария** / Michel Berger. Опубликовано: 15 Juni 1977 No 11.
132. **Пат. №** 569867 (**Швейцария**) Precede et dispositif pour reduire la teneur des produits pollnants contenue dans les gaz d'echappement dunmoteur a combustion interne: / Michel Berger. Опубликовано: 14 November 1975 No 20.
133. **Пат. №** 514783 (**Швейцария**) Verfahren und Eiarichtung zur besseren Verbrennung des kraftstoffes* in Verbrennungs motoren und gleichzeitiger Unterbindung der Bildung von giftigen Abgasen: / Eduard Haas. Опубликовано: 30 November 1971 No 21.

134. Пат. № 3893437 (США) Carburetor system: / Gordon E.Ries, Harley D.Johnson.
Опубликовано: 8 July 1975 No 2.
135. Пат. № 2079091 (Франция) Perfectionnement aux dispositifs pour augmenter le rendement des moteurs a explosion: / Euges Francois, Thiry Andre, Poignant Pierre. Опубликовано: 10 Decembre 1971 No 49.
136. Ревзин И.О. Основные предпосылки использования электростатических полей в двигателях внутреннего сгорания // Электронная обработка материалов. 1978. – № 6. С. 51-53.
137. Зафрин Э.Я. О возможности управления процессами горения в двигателях воздействием электрических полей / Э.Я. Зафрин, А.Ф. Дорендовский. // Изв. АН МССР. 1964. – № 5. С. 42-51.
138. Mayo P.J. Electrical controll of solid propellant burning / P.J. Mayo, L.A. Watermeier, F.J. Weinberg. // Proceedings of the Royal Society. Ser. A, Mathematical and Physical Sciences. 1965. – Vol. 284, No. 1398. P. 488 - 498.
139. Гейдон А.Г. Пламя, его структура, излучение и температура / А.Г. Гейдон, Х.Г. Вольфгард. // Пер. с англ. – М.: Металлургиздат. 1959. – 166с.
140. Дьячков Б.Г. К вопросу воздействия электрического поля на процесс сгорания / Б.Г. Дьячков, М.Г. Нефедова. // В кн.: Вопросы теории горения: Тр. Общесмоковского семинара по теории – М.: 1970. – С. 76-86.
141. Кузьмин М.А. Расчет и конструирование безинерционных печей – М.; Л.: Машгиз, Ленингр. отделение. 1961. – 223с.
142. Даггер. Распространение ламинарного пламени / Даггер, Симон, Герстеин. // В кн.: Основы горения углеводородных топлив. – М.: 1960. – С.321-409.
143. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах. / Б. Льюис, Г. Эльбе. // Пер.с англ. 2-е изд. – М.: Мир. 1968. - 589с.
144. Попов В.А. Спектроскопическое исследование плоского метано-воздушного пламени в электрическом поле / В.А. Попов, А.В. Шеклеин. // В сб.: Научно-технические проблемы горения и взрыва. – Новосибирск.: 1965. – № I. С.76- 79.

145. Салимов А.У. Вопросы теории электростатического распиливания жидкостей и интенсификации процессов сгорания жидких топлив в тепловых двигателях – Дис.докт.техн.наук. – Ташкент.: 1978. – 365с.
146. Ефимов Н.А. Влияние электрической обработки свежего заряда на показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя. – Дисс. на соискание уч. ст. кандидата тех. наук. – Ворошиловград.: 1984. – 212 с.
147. Гаврилов Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях. – Л.: Ленинград, университет. 1970. – 182 с.
148. Semenoff N. The Mechanism of the Upper Limit of Inflammation of Electrolytic Gas Mixture / N. Semenoff, A. Nalbandjan, Eubowizky. // Transactions of the Faraday Society. 1933. – Vol. 29, Part 9. P. 606 - 611.
149. Казанцев Л.И. Некоторые результаты работы дизелей на озонированном топливе / Л.И. Казанцев, С.А. Калашников, А.А. Сидоров. // Тр.Новосиб. ин-т инж. водного трансп. 1971. – Вып.63. С. 69-73.
150. Поль Р.В. Учение об электричестве. – Пер.с нем. – М.: Физ- матгиз. 1962. – 516с.
151. Малиновский А.Э. Исследование зажигания накаленной проволокой смеси метана с воздухом. Влияние электрического поля на период индукции / А.Э. Малиновский, Д.В. Маляр. // Журнал технической физики. 1935. – Т.5, Вып.7. С. 1260-1270.
152. Малиновский А.С. Влияние переменного электрического поля высокой частоты на скорость горения газа / А.С. Малиновский, В.С. Россыхин, В.П. Тимковский. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1934. – Т.4, Вып.2. С. 183-188.
153. Gaiginschi Emil. Cercetari privind influenta electrizarii exterioare a injectorului asuprafinetei pulverizarii combustibilului lichid / Emil Gaiginschi, Emil Sazarescu, Aurelian Simionescu, Ho- mutescu Oondrat-Adrian, Aleccandru Barjioanu. // Constr. mas. 1973. – Vol. 25, No. 8. – S. 475 – 479.
154. Колодяжный Д.Ю. Испытание экспериментальных образцов форсуночных модулей и оценка полученных результатов /Д.Ю.

- Колодяжный, В.С. Нагорный, А.М. Сипатов и др. // Отчет о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014 г № 14.577.21.0087). СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016. – 345 с.
155. Колодяжный Д.Ю. К вопросу о влиянии электрического заряда на поверхностное натяжение капель топлива на выходе форсунки // Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.А. Смирновский. // Вестник Московского авиационного института. 2016.– Т. 23. № 4. С. 59 – 68.
156. Колодяжный Д.Ю. Влияние электрического поля на распределение температуры продуктов сгорания керосино-воздушной смеси/ Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // Вестник Московского авиационного института, 2017. – Т. 24. № 1. С. 57 – 62.
157. Kolodyazhny D.Yu. Experimental study of the influence of electric field on parameters of kerosene-air mixture combustion/ D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorniy. // Russian Aeronautics. 2015. – Т 58. № 4. P.438-442.
158. Kolodyazhny D.Yu. Charge transfer in a sharply nonuniform electric field mediated by swirling liquid flow with minimal hydraulic resistance / V.S. Nagorniy, A.A. Smirnovsky, D.Yu. Kolodyazhny, A.S. Chemyshchev. // Technical Physics Letters. 2015. – Т. 41. № 4. P. 859-862.
159. Kolodyazhny D.Yu. Electric Charge Imposition on Hydrocarbon Fuel Drops in Sharply Inhomogeneous Electric Field of Injector Modules/ D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorniy. // Russian Aeronautics. ,2016. –Vol. 59. № 3. P. 402 – 407.
160. Колодяжный Д.Ю. Расчетное исследование влияния конструктивных параметров на характеристики распыла топлива пневматической форсункой / А.М. Сипатов, В.Я. Модорский, А.В. Бабушкина, Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // Известия ВУЗов. Авиационная техника . 2017. – № 3. С. 101– 105.

161. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование в вычислительной среде OPENFOAM распада струи жидкости в воздушном потоке применительно к распылу топлива в авиационных двигателях / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный, А.А. Саженов. // Системный анализ в проектировании и управлении. Научные труды XXI Международной научно-практической конференции. 29.06. – 30.06.2017 г. Ч.1. СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2017. – С. 321-331.
162. Колодяжный Д.Ю. Суперкомпьютерное моделирование с верификацией экспериментом электрогидродинамических процессов распыла керосина и горения керосино-воздушной смеси в авиационных двигателях / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения. Научные труды II Международной научно-технической конференции 11-15.09.2017г. Севастополь. Изд-во Севастопольского университета. 2017. – С. 19-22.
163. Денискин Ю.Д. Вопросы электрофизики монодиспергированного вещества. Труды МЭИ. 1983. – вып. 615. С. 86 – 103.
164. Нагорный В.С. Электрокаплеструйная автоматика в производстве химических нитей./ В.С. Нагорный, Ю.А. Левченко. – СПб.: Изд-во «Политехника». 2001. – 231 с.
165. Монодиспергирование вещества: принципы и применение. /Под ред. В.А. Григорьева. М.: Энергоатомиздат. 1991. – 331 с.
166. Верещагин И.П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. / И.П.Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. М.: Энергия. 1974. – 480 с.
167. Максимов Б.К. Искробезопасные режимы заполнения больших пластиковых резервуаров наэлектризованными нефтепродуктами. Научные труды МЭИ «Пути повышения качества и эффективности работы электротехнического оборудования». 1982. – № 2. С. 21 – 27.
168. Сипатов А.М. Применение методов трехмерного моделирования при конструировании пневматических форсунок. / А.М. Сипатов, С.А. Карабасов,

- Л.Ю. Гомзиков, Т.В. Абрамчук, Г.Н. Семаков. Вычислительная механика сплошных сред. 2013г. – Т 6. №3.
169. Ляпилин И.И. Введение в теорию кинетических уравнений. – Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 2004. – 332 с.
170. Усанин М.В. Применение методов высокого порядка точности для решения задач вычислительной газовой динамики и аэроакустики/ М.В. Усанин, А.А. Синер, А.М. Сипатов, Л.Ю. Гомзиков, В.Г. Августинovich. // Казань. Известия вузов. Авиационная техника. – 2011. – №1. С.27-32.
171. Сипатов А.М. Низко диссипативная фильтрация в разностных методах вычислительной газовой динамики / А.М. Сипатов, Л.Ю. Гомзиков, М.В. Усанин. // Вычислительная механика сплошных сред – Computational continuum mechanics. Пермь. – 2011. – т4. №3. С. 96-109.
172. Модорский В. Я. Газоупругие процессы в энергетических установках. / В. Я. Модорский, Ю. В. Соколкин. / Под ред. Соколкина Ю. В. – М. : Физматлит. 2007. – 176 с.
173. Козлова А.В. Численное моделирование кавитационных эффектов в замкнутой трубе с подвижной стенкой / А.В. Козлова, В.Я. Модорский. // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. – №2. С. 216-219.
174. Гайнутдинова Д.Ф. Численное моделирование кавитационных эффектов при действии вибрации / Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, Е.В. Мехоношина. // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. – №6. С. 219-222.
175. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе Пермского национального исследовательского политехнического университета. / Под ред. В.Я. Модорского. – Пермь. 2014. – 325 с.
176. Kozlova A.V. Numerical modeling of flow mixing and cooling processes in a perforated exhaust duct. / A.V. Kozlova, V.Ya. Modorsky, Y.V. Sokolkin, A.N. Ponik. // Russian Aeronautics, 57(2), 2014. – P. 181-186.

177. Shur M. L. Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction / M. L. Shur, M. K. Strelets, A. K. Travin, P. R. Spalart. // *AIAA Journal*. 2000. – Vol. 38, No. 5, p. 784-792.
178. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*, М., 1987. – 736 с.
179. Сербин С.И. Моделирование процесса распыливания жидкого топлива центробежной форсункой. / С.И. Сербин, С.И. Вилку. // *Авиационно-космическая техника и технология*, 2008. – №7. С. 95-98.
180. Semidetnov N. Conversion relationships for multidimensional particle sizing techniques / N. Semidetnov, C. Tropea. // *Meas. Sci. Technol.* 2004. – 15:112–18.
181. Shamami Kk. Assessment of the performances of RANS models for simulating swirling flows in a can-combustor/ Kk. Shamami, M. Birouk. // *Open Aerospace Engineering Journal*. – 2008. –V. 1. P. 8–27.
182. Benelli G. RANS simulation of a gas turbine combustor: a study on aerodynamics, mixing and heat transfer in combustive conditions. / G. Benelli, J. Brunetti, L. Carrai, S. Sigali. // *Proceedings of the European Combustion Meeting 2007*.
183. Patankar S.V. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows / S.V. Patankar, D.B. Spalding. // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. — 1972. — V.15. — №10. P.1787-1806.
184. Menter F. R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. // *AIAA Paper 93-2906*, 1993.
185. Menter F. R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry. // *Turbulence, heat and mass transfer*, V. 4, P. 625–632, 2003.
186. Menter F. The SST turbulence model with improved wall treatment for heat transfer predictions in gas turbines / F. Menter, J. C. Ferreira, T. Esch, B. Konno, A. C. Germany. // *Proceedings of the International Gas Turbine Congress-IGTC2003-TS-059*, 2003.

187. Smirnov P. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term / P. Smirnov, F. Menter. // *Journal of Turbomachinery*. — 2009. — V.131. — №4. P.041010
188. Shur M.L. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities / M.L. Shur, P.R. Spalart, M.K. Strelets, A.K. Travin. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, V. 29, № 6, P. 1638–1649, 2008.
189. Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений. / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. — Москва: Наука, 1978.
190. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979.
191. Волков К.Н. Применение метода контрольного объема для решения задач механики жидкости и газе на неструктурированных сетках. «Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии». — 2005. — Т.6 №1. с. 43-60.
192. Hossam S. Aly. A mathematical model for predicting spray atomization characteristics in an Eulerian–Eulerian framework. / S. Aly Hossam, Yehia A. Eldrainy, Khalid M. Saqr, M. Lazim Tholudin, Mohammad Nazri Mohd Jaafar. // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol 37. 2010.
193. Salvador Francisco Javier. Effect of turbulence model and inlet boundary condition on the Diesel spray behavior simulated by an Eulerian Spray Atomization (ESA) model./ Francisco Javier Salvador, Jaime Gimeno, José Manuel Pastor, Pedro Martí-Aldaraví. *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. - Vol 65.
194. Barth T.J. Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier—Stokes equations // VKI Lecture Series of Von Karman Institute for Fluid Dynamics. N 1994-04, Belgium, 1994.
195. Hoyasa Sergio. Evaluation of the Eulerian–Lagrangian Spray Atomization (ELSA) model./ Sergio Hoyasa, Antonio Gil, Xandra Margota, Dung Khuong-Anha, Frederic Ravet. in spray simulations: 2D cases. *Mathematical and Computer Modelling*. Vol 57. 2013.

196. Jameson A. Finite volume solution of the two-dimensional Euler equations on a regular triangular mesh / A. Jameson, D. Mavriplis. // AIAA Paper. 1985. – N 85-0435.
197. Yasushi Ito. Challenges in unstructured mesh generation for practical and efficient computational fluid dynamics simulations. *Computers & Fluids*. 2013. – Vol 85.
198. Kurbatskii Konstantin A. Numerical Simulation of Axisymmetric Jet Screech Tones Using a General Purpose Finite-Volume CFD Code. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010.
199. Morgan K. The computation of three dimensional flows using unstructured grids / K. Morgan, Peiro Perire, O. Hassan. // *Computational Methods in Applied Mechanics Engineering*. 1991. – Vol 87. P. 335-352.
200. Xie Zhihua. Adaptive unstructured mesh modelling of multiphase flows./ Zhihua Xie, Dimitrios Pavlidis, James R. Percival, L.M.A. Gomes Jefferson, Christopher C. Pain. Omar K. Matar. – *International Journal of Multiphase Flow*. 2014. – Vol 67.
201. Rodriguez Joseph M. A parallel adaptive mesh method for the numerical simulation of multiphase flows./ Joseph M. Rodriguez, Onkar Sahni, Richard T. Lahey Jr., E. Jansen Kenneth. – *Computers & Fluids*. 2013. – Vol 87.
202. Desjardins Olivier. Direct numerical and large-eddy simulation of primary atomization in complex geometries./ Olivier Desjardins, Jeremy O. McCaslin, Mark Owkes, Peter Brady. – *Atomization and Sprays*. 2013. – Vol 23.
203. Desjardins Olivier. Direct numerical and Large-Eddy Simulation of primary atomization in complex geometries./ Olivier Desjardins, Jeremy O. McCaslin, Mark Owkes, Peter Brady. – School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 2013.

204. Herrmann Marcus. Detailed Numerical Simulations of the Primary Atomization of a Turbulent Liquid Jet in Crossflow. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Arizona State University, USA, 2010.
205. Spalart P. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows". / P. Spalart and S. Allmaras. – Technical Report AIAA-92-0439. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1992.
206. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence./ B. E. Launder, D. B. Spalding. – Academic Press, London, England. 1972.
207. Wilcox. D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1998.
208. Menter F. R. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications" //AIAA Journal. 32(8). 1598–1605. August 1994.
209. KUAN Benny. CFD modelling of liquid jet and cascade breakup in crossflow.// Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. 2009.
210. Sagaut Pierre. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows (Third ed.)/ Springer. ISBN 3-540-26344-6. 2006.
211. Navarro-Martinez. S. Large eddy simulation of spray atomization with a probability density function method. International Journal of Multiphase Flow. 2014. –Vol 63.
212. Козелков А. С. “Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей” / А.С. Козелков, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина, О.Л. Пучкова.//, Матем. моделирование, 26:8. 2014. – 81–96.
213. Menter F. R. “Development and Application of a Zonal DES Turbulence Model for CFX-5” / F. R. Menter and M. Kunt. // CFX-Validation Report, CFX-VAL17/0503.
214. Menter F.R. "A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models"/ F.R. Menter and Y. Egorov.// AIAA paper 2005-1095, Reno/NV, 2005.

215. Ardalan Javadi. LES and DES of Strongly Swirling Turbulent Flow through a Suddenly Expanding Circular Pipe./ Javadi Ardalan, Nilsson Håkan. – Computers & Fluids. 2014.
216. Fletcher D.F. Scale-adaptive simulation (SAS) modelling of a pilot-scale spray dryer. / D.F. Fletcher, T.A.G. Langrish. – Chemical Engineering Research and Design, 2009.–Vol. 87, Issue 10.
217. Derakhshandeh Javad Farrokhi. The effect of arrangement of two circular cylinders on the maximum efficiency of Vortex-Induced Vibration power using a Scale-Adaptive Simulation model./Javad Farrokhi Derakhshandeh, Maziar Arjomandi, Bassam Dally, Benjamin Cazzolato. – Journal of Fluids and Structures. 2014.–Vol.49.
218. Hirt C.W. (1981), "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries"/ C.W. Hirt, B.D. Nichols. // Journal of Computational Physics 39 (1): 201–225.
219. Chang, Y. C. A Level Set Formulation of Eulerian Interface Capturing Methods for Incompressible Fluid Flows. / Y. C. Chang, T. Y. Hou, B. Merriman and S. Osher. – J. Comput. Phys. 124, (1996).
220. Osher S. "Fronts Propagating with Curvature-dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations". / S. Osher, J. A. Sethian //J. Comput. 1988. – Phys. 79. 12–49.
221. Леонов А. А. Методы прямого численного моделирования в двухфазных средах / А.А. Леонов, В.В. Чуданов, А.Е. Аксенова. //Труды ИБРАЭ РАН. под общ. ред. чл.-кор. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М.: Наука, 2007.
222. Perkowski Witold. Study on kerosene atomization process under a high speed air stream./ Witold Perkowski, Andrzej Irzycki, Krzysztof Snopkiewicz, Lukasz Grudzin, Michal Kawalec. – Institute of Aviation, Warszawa, Poland 2011.
223. Pai M. G. Detailed simulations of primary breakup of turbulent liquid jets in crossflow./ M. G. Pai, O.S. Desjardin, H. Pitsch. – Center for Turbulence Research Annual Research, 2008.

224. Apte S.V. LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup./ S.V. Apte, M. Gorokhovski, P. Moin. – Department of Mechanical Engineering, Stanford University, 2003.
225. Koutsakis Konstantinos. Three dimensional CFD simulation of liquid copper break up for the liquid precursor spraying./ Konstantinos Koutsakis, Sai Gu, Armelle Vardelle. // Surface & Coatings Technology 220 (2013) p.214–218.
226. Остапенко А.А. Электровязкостный эффект в переменном электрическом поле // Журнал технической физики, 2000. – т. 70, вып.8.
227. Дудышев. В.Д. Энергетическое и экологическое совершенствование тепловых моторов автотранспорта. / NTPO.COM - 13 с.
228. Дудышев В.Д. Новая электроогневая технология экологически чистого сжигания любых веществ и отходов. /Горение, Интернет. 15.11. 2007. – 12 с.
229. Звонов В.А. Влияние на рабочий процесс ДВС активирования топлива внешними физическими воздействиями / В.А. Звонов, Н.А. Макаров. //Двигатели внутреннего сгорания, 2008. – № 2. С.112-121.
230. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. - 320 с.
231. Девкин Ф.М. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь в лабораториях серии ЛВИ НVT. Практическое пособие. Холдинговая компания «ЭМЗ». Ярославль. 2008. – 100 с.
232. Сосинский С.Л. Влияние электрического поля на вязкость жидкостей. Автореф. канд. физмат. наук. Л.: ЛГУ. 1938.
233. Gosse B. // Electroanalchem. and Interfacial Electrochem. 1975. Vol. 61. P. 265-270.
234. Schmidt G.M. Effect of electrostatic field on the surface tension of salt solution / G.M. Schmidt, R.M. Hurd, E.S. Snavely. // J. Electroche. Soc. — 1962. — Vol.109. N 9. P. 852-858.
235. Ефимов Н.А. Исследование влияния электрического поля на поверхностное натяжение бензинов при их истечении / Н.А. Ефимов, В.А.

- Звонов, А.М. Красносельский. // В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. — Вып. 27. — Харьков, Изд-во ХГУ. — 1978. — С. 40-46.
236. Ефимов Н.А. Исследование влияния характера прикладываемого напряжения на истечение бензина / Н.А. Ефимов, В.А. Звонов, Л.Я. Ефимова. // Электронная обработка материалов. — 1979. — № 1. С. 45-47.
237. Byers C.H. Drop formation from an orifice in an electric field / C.H. Byers, J.J. Perona. // AIChE Journal. — 1988. — Vol. 34. — N 9. P. 1577–1580.
238. Морозов В.И. Влияние электрофизического воздействия на эксплуатационные свойства дизельного топлива / В.И. Морозов, Я.Е. Белоконь, А.И. Окоча. // Исследования процессов подготовки, применения и контроля качества авиаГСМ и спецжидкостей. — 1992. — № 5. С. 94–98.
239. Sato M. Surface tension reduction of liquid by applied electric field using vibrating jet method / M. Sato, N. Kudo, M. Saito. // IEEE Trans. Ind. Apps. — 1998. — Vol.34. N2. P. 294-300.
240. Boström M. Ninham Surface Tension of Electrolytes: Specific Ion Effects Explained by Dispersion Forces /M. Boström, D.R.M. Williams, B.W. Ninham.// Langmuir. — 2001. — Vol. 17. N 15. P. 4475–4478.
241. Kim Y.-J. Numerical and Experimental Analysis of Electrostatic Ejection of Liquid Droplets / Y.-J. Kim, H.S. Ko. // Journal of the Korean Physical Society. — 2007. — Vol. 51. P. S42-S46.
242. Weon B.M. Ionization-induced surface tension reduction of water droplets / B.M. Weon , J.H. Je. // Applied Physics Letters. — 2008. — Vol. 93. N 24. P. 244105.
243. Lima E.R.A. Specific ion effects on the interfacial tension of water/hydrocarbon systems / E.R.A. Lima, B.M. de Melo, L. T. Baptista, M.L.L. Paredes. // Brazilian Journal of Chemical Engineering. — 2013. — Vol. 30. N 1. P. 55–62.
244. Русанов А.И. О влиянии электрического поля на поверхностное натяжение полярной жидкости / А.И. Русанов, В.Л. Кузьмин. // Коллоидный журнал. — 1977. — Т.39. № 2. С. 388-390.

245. Русанов А.И. К термодинамике нуклеации на загрязненных центрах // Докл. АН СССР. — 1978. — Т. 238. № 4. С. 831-834.
246. Ревзин И.С. Безмоторное исследование влияния переменного электрического поля на смесеобразование во впускной системе двигателя // Автомобильная промышленность. — 1980. № 1. С. 5-7.
247. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем/ Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгальок. — СПб.: НИИХ СПбГУ. — 1999. — 194с.
248. Рудин М.Г. Карманный справочник нефтепереработчика. / М.Г. Рудин, В.Е. Сомов, А.С. Фомин. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2004. — 336 с.
249. Weon В.М. Decreased Surface Tension of Water by Hard-X-Ray Irradiation / В.М. Weon, J.H. Je, Y. Hwu, G. Margaritondo. // Physical Review Letters. — 2008. — Vol. 100. P. 217403(4).
250. Du E. Reducing the Viscosity of Diesel Fuel with Electrorheological Effect / E. Du, H. Tang, K. Huang, R. Tao. // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. — 2011. — V. 22. № 15. P.1713–1716.
251. Tao R. Neutron scattering studies of crude oil viscosity reduction with electric field / R. Tao, E. Du, H. Tang, X. Xu. // Fuel. — 2014. — V. 134. P. 493–498.
252. Tao R. The Physical Mechanism to Reduce Viscosity of Liquid Suspensions // International Journal of Modern Physics B. — 2007. — V. 21. P.4767–4773.
253. Оно С. «Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях» / С. Оно, С. Кондо. — Изд. ИЛ, 1963. — 290 с.
254. Santos L. P. Water with Excess Electric Charge. / L. P. Santos, D. Ducati T. R., Balestrin L. B. S. and Galembeck F.. *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, No. 22. 2011 P. 11226–11232.
255. Shrimpton J. S. Dielectric charged drop break-up at sub-Rayleigh limit conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 3, 2005. pp. 573–578.
256. Ahern J.C. Experimental Electrohydrodynamic Nanospray Production using Drawn Glass Capillaries. / J.C. Ahern, W. Balachandran. // *Particulate Science and Technology: An International Journal*. Volume 24, Issue 3, 2006, p.271-

- 280.
257. Копейкина Э.К. Влияние электрического поля на поверхностное натяжение неполярных жидкостей. *Электронная обработка материалов*, 1970. – В 4. с.57-59.
258. Тамм И. Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. 11-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
259. Van Poppel B. Simulating Electrohydrodynamic Atomization for Fuel Injection / Poppel B. Van, O. Desjardins, J. W. Daily. // ILASS-Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. — Cincinnati, OH. — May 2010.
260. Нагорный В.С. Начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда при малых межэлектродных промежутках // *Электричество*. 2004. – № 12. С. 8–11.
261. Стишков Ю.К. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках /Ю.К. Стишков, А.А. Остапенко. — Л.: Изд-во ЛГУ. — 1989. — 174 с.
262. Стишков Ю. К., Чирков В. А. Особенности структуры приэлектродных диссоциационно-рекомбинационных заряженных слоев при разных уровнях низковольтной проводимости слабопроводящей жидкости/ Ю. К. Стишков, В. А. Чирков. // *Журнал технической физики*. — 2013. — Т.83. №12. С.119-127.
263. Adamiak K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review // *Journal of Electrostatics*. — 2013. — V.71. P. 673–680.
264. Отчет по теме «Экспериментальное исследование влияния устройства «Молекулярный модификатор топлив (ММТ)» на экономические и экологические показатели автомобильных двигателей. ФГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». 2010.
265. Колодяжный Д.Ю. Исследование технического уровня и тенденций развития разработок форсуночных модулей / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный, А.С.

- Филиппов и др. // Отчет о патентных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки России от «05» июня 2014 г. № 14.577.21.0087), СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2014. – 154 с.
266. Stishkov K. The investigation of the recombination area of symmetric-opposite EHD Flows. / K. Stishkov and I. A. Elagin. – Yu., Proceedings of the 15th International Conference on Dielectric Liquids, 2005.
267. Buyanov A.V. «Peculiarities in the Structure of Electrohydrodynamic Through Flow in a Symmetric Electrode» / A.V. Buyanov, K. Stishkov. – System Technical Physics, 2004.
268. Buyanov A.V. «Methods of electric discharge modeling by ANSYS package» / A.V Buyanov, I.A. Elagin, M.A. Pavleyno, Yu.K. Stishkov, A.A. Statuya. Proceedings of XXI International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2004.
269. Chirkov V.A. «Current-time characteristic of the transient regime of electrohydrodynamic flow formation» / V.A. Chirkov, Yu.K. Stishkov. – Journal of Electrostatics №71, 2013.
270. Constantin-Narcis Ostahie. «Kinetics of mechanical impurities electroseparation from dielectric liquids» / Constantin-Narcis Ostahie, Tudor Sajin. – Journal of Electrostatics №71, 2013.
271. Ашихмин Е.А. «Влияние стенок из изолирующего материала на структуру электрогидродинамических течений в канале» / Е.А. Ашихмин, Ю.К. Стишков. Журнал технической физики 2012. – т.82 №9.
272. Чирков А.А. «Компьютерное моделирование ЭГД-течений в системе электродов игла-полость»/ А.А. Чирков, Ю.К. Стишков. – Журнал технической физики 2008. – т.78 №11.
273. Стишков Ю.К. «Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод-провод / Ю.К. Стишков, И.А. Елагин. – Журнал технической физики 2005. – т.75 №9.

274. Глущенко И.В. «Моделирование структуры сквозного ЭГД-течения в системе провод-провод». / И.В. Глущенко, Ю.К. Стишков. Санкт-Петербургский государственный университет, 2007.
275. Lima N.C. «Numerical simulation of electrohydrodynamic flows of Newtonian and viscoelastic droplets» / N.C. Lima, M.A. d'Avila. – *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2014.
276. Taylor G. «Disintegration of water drops in an electric field»./ *Proc. R. Soc. Lond., Ser. A Math. Phys. Sci.* 280 (1964) 383–397, 1964.
277. Lypez-Herrera J.M. «A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using volume-of-fluid»/ J.M. Lypez-Herrera, S., Popinet, M.A. Herrada. – *Journal of computational Physics* №230, 2011.
278. Ghazanchaei Mohammadreza. «Predicted flow characteristics of a wire-nonparallel plate type electrohydrodynamic gas pump using the Finite Element Method» / Mohammadreza Ghazanchaei, Kazimierz Adamiak, G.S. Peter Castle. – *Journal of electrostatics* №73, 2015.
279. Farnoosh N. «Three-dimensional analysis of Electrohydrodynamic flow in a spiked electrode-plate electrostatic precipitator» / N. Farnoosh, K. Adamiak, G.S.P. Castle. – *Journal of Electrostatics* №69, 2011.
280. Khoshnevis A. Electric field induced sheeting and breakup of dielectric liquid jets /A. Khoshnevis, S.S.H. Tsai, E. Esmaeilzadeh. // *Physics of Fluids*. — 2014. — V.26 P.012103
281. Traoré P. Numerical simulation and PIV experimental analysis of electrohydrodynamic plumes induced by a blade electrode /P. Traoré, M. Daaboul, C. Louste. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2010. — V.43. №22. P.225502.
282. Tomar G. Two-phase electrohydrodynamic simulations using a volume-of-fluid approach / G .Tomar, V .Gerlach, G. Biswas, N. Alleborn, A. Sharma, F.Durst, S. W. J. Welch, A. Delgado. // *Journal of Computational Physics*. — 2007. — V.227. №2. P.1267-1285.

283. Pollard A. Turbulent, swirling flow over an axisymmetric, constant radius surface / A. Pollard, H.L.M. Ozem, E.W. Grandmaison. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2005. — Vol. 29. P.493-509.
284. Liu Z. Study of Axial Velocity in Gas Cyclones by 2D-PIV, 3D-PIV, and Simulation / Z. Liu, J. Jiao, Y. Zheng. // *China Particuology*. — 2006. — Vol. 4. №3-4. P.204-210.
285. Alekseenko S. V. Effect of axisymmetric forcing on the structure of a swirling turbulent jet / S. V. Alekseenko, V. M. Dulin, Y. S. Kozorezov, D. M. Markovich. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2008. — Vol. 29. P.1699-1715.
286. Gui N. A direct numerical simulation study of coherent oscillation effects of swirling flows / N. Gui, J.R. Fan, K. Cen, S. Chen. // *Fuel*. — 2010. — Vol. 89. P.3926-3933.
287. Chang C.-Y. Swirling flow in a tube with variably-shaped outlet orifices: An LES and VLES study / C.-Y. Chang, S. Jakirlic, K. Dietrich, B. Basara, C. Tropea. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2014. — Vol. 49. P.28-42.
288. Hreiz R. Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones/ R. Hreiz, C. Gentric, N. Midoux. // *Chemical Engineering Research and Design*. — 2011. — Vol. 89. P.2521-2539.
289. Guo H.F. Simulation of the effect of geometric parameters on tangentially injected swirling pipe airflow / H.F. Guo, Z.Y. Chen, C.W. Yu. // *Computers & Fluids*. — 2009. — Vol. 38. P.1917-1924.
290. Wen C. Swirling flow of natural gas in supersonic separators / C. Wen, X. Cao, Y. Yang. // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. — 2011. — Vol. 50. P. 644-649.
291. Gupta A. Three-dimensional turbulent swirling flow in a cylinder: Experiments and computations/ A. Gupta, R. Kumar. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2007. — Vol. 28. P.249-261.

292. Chen J. A numerical and experimental study of tangentially injected swirling pipe flows/ J. Chen, B. S. Haynes, D. F. Fletcher. // Second international conference on CFD in the minerals and process industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 december. — 1999.
293. Pruvost J. Numerical investigation of bend and torus flows, part I : effect of swirl motion on flow structure in U-bend / J. Pruvost, J. Legrand, P. Legentilhomme. // Chemical Engineering Science. — 2004. — Vol. 59. P.3345-3357
294. Eiamsa-ard S. 3-D Numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes / S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, S. Sripattanapipat. // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2009. — Vol. 36. No 9. P.947-955.
295. Parchen R.R. An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Pipe Flows / R.R. Parchen, W. Steenbergen. // Transactions of the ASME. — 1998. — Vol. 150. P.54-61.
296. Жакин А.И. Электрогидродинамика // Успехи физических наук. — 2012. — Т.182. №5. С.495-520.
297. Стишков Ю. К. Формирование электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования/ Ю. К. Стишков, В. А. Чирков. // Журнал технической физики. — 2012. — Т.82. №1. С.3-13.
298. Reynolds A. J. The prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1975. — V.18. №9. P.1055-1069.
299. Нагорный В.С. Средства автоматики гидро – и пневмосистем.: СПб., Москва, Краснодар, Издательство ЛАНЬ, 2014. - 448 с.
300. Qingzhen Yang. «3D phase field modeling of electrohydrodynamic multiphase flows»/ Yang Qingzhen, Q. Li Ben, Ding Yucheng. – International Journal of Multiphase Flow №57, 2013.

301. Escue A. Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows/ A. Escue, J. Cui. // Applied Mathematical Modelling. — 2010. — Vol. 34. P.2840-2849.
302. Najafi A.F. Numerical analysis of turbulent swirling decay pipe flow / A.F. Najafi, M.H. Saidi, M.S. Sadeghipour, M. Souhar. // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2005. — Vol. 32. — P.627-638.
303. Shamami K. K. Assessment of the Performances of RANS Models for Simulating Swirling Flows in a Can-Combustor / K.K. Shamami, M. Birouk. // The Open Aerospace Engineering Journal. — 2008. — Vol. 1. P.8-27.
304. Ortega-Casanova J. CFD and correlations of the heat transfer from a wall at constant temperature to an impinging swirling jet // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2012. — Vol. 55. P.5836-5845.
305. Уилбрэхэм Н. Топливная форсунка. Патент РФ2419030, заявка 06.09.2007, опубликовано 20.05.2011.
306. Tominaga Y. Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield / Y. Tominaga, T. Stathopoulos. // Atmospheric Environment. — 2007. — V.41. №37. P.8091-8099
307. Bradshaw P. Effects of Streamline Curvature on Turbulent Flow. — AGARD-AG-169. — 1973. — 134 P.
308. Spalart P. R. On the Sensitization of Turbulence Models to Rotation and Curvature / P. R. Spalart, M. Shur. // Aerospace Science and Technology. — 1997. — №5. P.297-302.
309. OpenFOAM — The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox /[Электронный ресурс]. — URL: <http://www.openfoam.org> (дата обращения: 19.11.2014).
310. Shur M. L. Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction / M. L. Shur, M.K. Strelets, A.K. Travin. P. R. Spalart// AIAA Journal. 2000. – Vol. 38, No. 5. pp. 784-792.
311. Issa R. Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting // Journal of Computational Physics. — 1986. — V.62. №1. P.40-65.

312. Koh S.G. The phase-dependence of a swirling, turbulent boundary layer / S.G. Koh, P.D. Clausen, D.H. Wood. // Proc. 10th Australasian Fluid Mech. Conf. — Melbourne, Australia, 11-15 Dec. — 1989. — P.7.5-7.8.
313. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М. «Машиностроение», 1975.
314. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД // Москва, Мир, 1986. – 566 с.
315. Wilcox D.C. A two-equation turbulence model for wall-bounded and free-shear flows// AIAA Paper 93-2905, 1993.
316. Launder B.E. The Numerical Computation of Turbulent Flows/ B.E. Launder, D.E. Spalding. // Computation Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. – Volume 4. P. 269-289.
317. Сипатов А.М. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей / А.М. Сипатов и др. // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. – Т. 8. № 1. С. 93–101.
318. Лазерно-оптические методы диагностики процессов горения (учебное пособие). / А.А. Диденко, В.В. Бирюк, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. –187с.
319. Колодяжный Д.Ю. **Среднезаутеровский диаметр капель керосина при работе форсуночных модулей с электрическим полем в узлах распыла топлива газотурбинных авиационных двигателей в реальных условиях их эксплуатации.** / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный, А.М. Сипатов. // Системный анализ в проектировании и управлении (SAES-2018). Научные труды XXII Международной научно-практической конференции. 22.05 – 24.05.2018г. СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2018.
320. ANSYS ICEM CFD Theory Guide. ANSYS Meshing Theory Guide. ANSYS FLUENT release 15.0. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX release 15.0.

321. ANSYS ICEM CFD Theory Guide. ANSYS ICEM CFD release 15.0.
322. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX release 15.0.
323. Ansys Theory Guide, 2013.
324. Программные продукты Ansys. Гидродинамика, М.: 2014.
325. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. - Л.: Химия. 1982.
326. Tanner F.X., Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays. // SAE Technical Paper Series, 970050, 1997.
327. Sivathanu Y.R. Generalized State Relationships for Scalar Properties in Non-Premixed Hydrocarbon / Y.R. Sivathanu, G.M. Faeth. // Air Flames. Combustion and Flame, 82: 1990. - P. 211-230.
328. Kuo K.K. Principles of Combustion. New York: Wiley, 1986.
329. Magnussen B.F. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager. // In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute, 1976.