

*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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
Нагорный Владимир Степанович

Официальные оппоненты:

Лепешинский Игорь Александрович – доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»,  
профессор кафедры «Теория  
воздушно-реактивных двигателей»

Мясников Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор,  
ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр», главный научный  
сотрудник

Ремизов Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Рыбинский  
государственный авиационный  
технический университет имени П.А.  
Соловьева», заведующий кафедрой  
«Авиационные двигатели»

Ведущая организация: Публичное акционерное общество  
«ОДК-Сатурн»

Защита состоится 23 марта 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [https://mai.ru/upload/iblock/b14/Kolodyazhnyu\\_-dissertatsiya-8.11.2019.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/b14/Kolodyazhnyu_-dissertatsiya-8.11.2019.pdf)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08,  
доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследований.* В настоящее время во всём мире ведутся активные исследования по созданию высокоскоростных транспортных средств, обеспечению экологии и высокой энергоэффективности авиационных двигателей. 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 (КС) 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 КС. 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 авиадвигателя, вынуждает разработчиков интенсивно заниматься проектированием низкоэмиссионных КС. 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 КС газотурбинного авиадвигателя.

Общей магистральной тенденцией развития авиационных газотурбинных двигателей является дальнейшее повышение основных параметров их термодинамического цикла, в частности, температуры газа перед турбиной  $T_{\Gamma}^*$ . От авиационных двигателей четвертого поколения к авиадвигателям пятого поколения это повышение по опубликованным данным составило, соответственно, от  $T_{\Gamma}^* = 1500 \dots 1700$  К до  $1900 \dots 1930$  К. То есть при разработке авиадвигателей пятого поколения передовым научно-техническим коллективам удалось конструктивными методами повысить температуру газа перед турбиной  $T_{\Gamma}^*$  по сравнению с авиадвигателями четвертого поколения только в среднем на 315 К, что соответствует  $42^{\circ}$  С.

Следовательно, актуально повышение  $T_{\Gamma}^*$  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  $T_{\Gamma}^*$  при сгорании топливо-воздушной смеси (ТВС). При этом решается сложная комплексная конструктивная (применительно к форсункам) материаловедческая и теплофизическая проблема, поскольку допустимые уровни температур перед турбиной ограничиваются рабочими температурами применяемых материалов и эффективностью системы охлаждения турбинных лопаток. 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.

Таким образом, одним из путей решения обозначенной выше актуальной проблемы является улучшение качества распыла топлива и сгорания ТВС в авиадвигателях.

Как правило, существенного улучшения качественных показателей существующими методами и технологиями не удастся. Поэтому обеспечение заданных характеристик ТВС при её сгорании с использованием новых физических явлений является актуальной задачей для авиастроения.

В настоящей работе предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания ТВС использовать электрокаплеструйные (ЭКС) технологии с соответствующим образом организованными легко управляемыми электрическими полями в цепях подачи топлива к форсунке и (или) непосредственно в самой форсунке при распыливании топлива на капли. При этом можно **дополнительно** улучшить параметры распыла и горения в авиадвигателях даже при оптимизированных конструктивными методами топливных центробежных и пневматических форсунок. С использованием уже имеющегося в авиадвигателях напряжение питания 27В или 12В снимались при прочих одинаковых условиях соответствующие характеристики распыла и горения без электрического поля и с электрическим полем и сравнивались результаты. Потребляемая маловесогабаритными блоками питания выходная электрическая мощность электрических устройств воздействия на топливо (ЭУВТ) не превышает 1Вт, электрическая схема обладает внутренней электробезопасностью, экранированием устраняется электростатическое влияние выходного каскада на низковольтную часть и аппаратуру.

Основные результаты настоящей диссертационной работы были получены в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», утвержденной постановлением Правительства от 21.05.2013 № 426.

**Объектами исследований** и разработок являются электрокаплеструйные узлы распыла топлива и сгорания ТВС применительно к авиадвигателям.

**Предметом исследований** являются электрокаплеструйные методы и электрогидродинамические (ЭГД) процессы при воздействии электрических полей на топливо, сообщении электрического заряда потоку и каплям углеводородного топлива (керосина) и влияние электрического поля на ЭГД процессы распыла топлива и горения ТВС. В частности, применительно к камере подогрева стартер воздушно газовый (КП СТВГ) турбореактивного двигателя боевого самолета (разработки ОКБ им. А. Люльки, г. Москва) и КС газотурбинного авиационного двигателя пятого поколения ПД-14 (разработки АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь) со взлетной тягой от 8 до 16 тонн, предназначенного прежде всего для гражданских самолетов типа МС-21.

#### ***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 - ЭКСФМ)<sup>1</sup> авиационных двигателей выбором их рациональных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей.

Внедрение разработанных ЭКСФМ и ЭКС технологий вносит значительный вклад в развитие страны.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- анализ современного состояния и направлений: повышения эффективности процессов распыла и горения углеводородных топлив с использованием электрических полей; повышения точности численных вычислений применительно к электрогидродинамическим и гидродинамическим процессам переноса электрического заряда закрученным потоком диэлектрического топлива, распылению топлива в газовой среде, горению ТВС; физических моделей получения униполярного электрического заряда в резко неоднородном электрическом поле в диэлектрических жидкостях, к которым относится авиационное топливо;

- нахождение с использованием электрогидродинамических численных моделей применительно к авиационному топливу и авиационным форсункам максимальной величины электрического заряда в углеводородном топливе (керосине) и в закрученном потоке топлива на выходе топливных форсунок с целью оценки максимального управляющего ЭГД воздействия в ЭКСФМ;

- разработка инжекционной модели образования униполярного электрического заряда в резко неоднородном электрическом поле применительно к авиационному топливу (керосину) и авиационным форсункам с целью задания граничных условий при суперкомпьютерных вычислениях процессов распыла керосина ЭКСФМ и сгорания ТВС.

- решение задач конструктивной реализации резко неоднородных электрических полей в цепи питания центробежных и пневматических топливных форсунок и в самой форсунке авиационных двигателей для получения униполярного электрического заряда в керосине;

- исследование влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капель углеводородного топлива при распыле топливными форсунками и разработка математической модели по результатам исследований;

- разработка (на основе ЭГД методов) численных моделей с ориентацией на суперкомпьютерные вычисления влияния заряда и резко неоднородных электрических полей на распыл керосина в топливных форсунках авиадвигателей и горения керосино-воздушной смеси как в модельных, так и в реальных КС газотурбинных двигателей. При этом используются

---

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

разработанные уточненная для авиационного топлива (керосина) инжекционная модель получения униполярного электрического заряда в топливе и математическая модель его влияния на эффективное поверхностное натяжение капель керосина;

- научные закономерности влияния на указанные выше процессы конструктивных, электрогидродинамических, гидродинамических и электрических параметров;

- верификация экспериментом результатов численных суперкомпьютерных вычислений с ориентацией на использование самых современных методов как при реализации суперкомпьютерных вычислений, так и экспериментальной базы в организациях и ВУЗах России;

- разработка методов и технологий получения и обработки керамических изоляционных деталей в ЭКСФМ авиационных двигателей, одновременно отвечающих требованиям обеспечения жаропрочности и диэлектрической проницаемости.

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

Предложена стратегия исследований и разработок ЭКСФМ с ЭУВТ, основанная на разработанной технологии Динамического конструирования. Данная технология предусматривает использование суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций ЭКСФМ на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау» за счет рационального выбора взаимосвязанных электрогидродинамических, гидродинамических, конструктивных и электрических параметров. Мировая новизна и практическая значимость полученных результатов подтверждены выдачей автору 6 патентов РФ.

Впервые применительно к газотурбинным авиационным двигателям (на примере современного инновационного авиадвигателя пятого поколения типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения ТВС с использованием ЭУВТ и переменных однородных и резко неоднородных электрических полей с изменяющейся частотой. Разработаны принципы построения ЭКСФМ с использованием ЭУВТ в гидравлической цепи питания топливной форсунки и в самой форсунке и различных электрических полей.

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 эффективного поверхностного натяжения капли топлива от величины униполярного электрического заряда. Данная формула, хорошо отображающая результаты экспериментов, используется при дальнейших численных расчетах по распылу топлива и горения топливно-воздушной смеси.

Разработаны методы повышения эффективности электризации углеводородных топлив и ТВС, математические модели ЭГД процессов сообщения униполярного электрического заряда углеводородным топливам в

резко неоднородном электрическом поле ЭУВТ. Проведен анализ физических моделей образования заряда в потоке топлива и предложено для дальнейших численных исследований принять инжекционную модель. Применительно к авиационному топливу (керосину) на базе проведенных экспериментальных исследований уточнена инжекционная модель, используемая в дальнейших численных расчетах.

Разработан, теоретически исследован с верификацией экспериментом и обобщен целый ряд принципиально новых ЭКС методов распыла топлива, горения ТВС в КС 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 - ЭКСФМ и ЭКС технологий и определяет дальнейшие пути целенаправленного поиска частных электрокаплеструйных методов. При этом новыми являются большинство результатов, поскольку большинство методов и ЭКСФМ 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):

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

Разработана (с использованием вихререзрешающих подходов для моделирования турбулентности DES и LES) трехмерная численная ЭГД модель ЭКСФМ с закрученным турбулентным течением керосина как без, так и с учетом ЭГД взаимодействия. При этом электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки и при снятии напряжения с электродов форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды работает как ЭКСФМ. 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 электрического заряда достигает около 80% инжектируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный поток керосина. Исследовано влияние конструктивных параметров электродной системы и степени закрутки керосина на количество выносимого заряда закрученным потоком на выходе топливной форсунки авиадвигателей. Даны рекомендации по оптимизации конструкции ЭКСФМ.

На основании проведенных теоретических исследований сформулированы требования к скорости и параметрам капель углеводородных топлив в ЭКСФМ авиадвигателей для обеспечения их максимального заряда в электрическом поле коронного разряда.

Решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей рассматриваемых процессов применительно к авиадвигателям 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 к решению таких сложных процессов, как рассматриваемые ЭГД процессы при распыле топлива (керосина) и горения ТВС.

На основании проверенных экспериментом разработанных численных моделей проведены численные исследования влияния конструктивных, ЭГД, гидродинамических, электрических параметров на параметры распыла и горения, обобщены результаты численных исследований, даны рекомендации по выбору и выбраны рациональные параметры ЭКСФМ.

Эффективность такого подхода продемонстрирована на примере оптимизированного при различных режимах работы авиадвигателя образца экспериментальной пневматической форсунки для современного инновационного авиадвигателя пятого поколения ПД-14 (ЭОФ), как элемента ЭКСФМ. Для него выбраны (с позиций обеспечения требуемых газодинамических характеристик воздушного потока в форсунке и на выходе из нее, равномерности распределения жидкой фазы в ТВС, 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 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 ЭГД процессов распыла топлива (керосина) впервые изготовлены (на основании результатов численных 3D CFD расчетов) экспериментальные образцы ЭКСФМ (электропневматической форсунки - ЭПФ) с электродной системой ЭУВТ внутри форсунки 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 ЭКС методов расчета 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 ЭКСФМ, позволяющие выполнить их 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 ЭКСФМ для их

выполнения в модульно-блочном исполнении.

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 ЭКСФМ.

Совокупность полученных результатов составляет научные основы расчета и современного конструирования эффективных ЭКСФМ.

**Личный вклад автора** в проведенное исследование определяется комплексом сформулированных задач в рамках разработанной технологии динамического конструирования по созданию научных основ расчета, реализационных основ и современного конструирования эффективных ЭКСФМ с различного типа форсунок применительно к газотурбинным и турбореактивным авиационным двигателям на примере авиадвигателя пятого поколения ПД-14 для гражданских самолетов и КП СТВГ боевого самолета. Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проведенные исследования. Основные результаты получены лично автором или с его непосредственным участием.

Результаты диссертационного исследования внедрены в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь применительно к инновационному газотурбинному авиационному двигателю пятого поколения типа ПД-14 в рамках выполненных прикладных научных исследований (ПНИ) при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор ПНИ REMEF157714X0087. В этих прикладных исследованиях АО «ОДК-Авиадвигатель» выступал как Индустриальный партнер. Кроме того, результаты диссертации использованы в ОКБ им. А. Люльки, г. Москва в рамках выполненных хозяйственных работ применительно к камере подогрева стартер воздушно газовый (КП СТВГ) турбореактивного двигателя.

Как известно, на базе газогенератора двигателя ПД-14 будет создано семейство газотурбинных установок для транспорта нефти и электростанций нового поколения, соответствующих самым жестким современным и перспективным мировым требованиям к эффективности, экологичности и надежности.

Реализация полученных результатов позволит более эффективно управлять (в том числе от микроЭВМ) дисперсностью топлив, процессами образования ТВС, испарения топлив, воспламенения и горения топлив и их смесей не только в различных типах авиадвигателей, но и в газотурбинных установках, в двигателях внутреннего сгорания.

**Методология и методы исследования** основаны на разработанной технологии Динамического конструирования, предусматривающей:

- разработку с позиций увеличения точности численных расчетов ЭГД численных математических моделей рассматриваемых процессов в реальных конструкциях ЭКСФМ, в модельных и реальных КС авиационных газотурбинных двигателях с использованием ЭКСФМ;

- использование суперкомпьютерных вычислений на современных

вычислительных кластерах высокой производительности при исследовании разработанных математических моделей;

- выбор на основании суперкомпьютерных вычислений взаимосвязанных в математических моделях электрических, электрогазодинамических, газодинамических и конструктивных параметров таким образом, чтобы обеспечить рациональные показатели процессов распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси;

- верификации экспериментом разработанных на основании численных расчетов реальных конструкций рассматриваемых узлов авиадвигателя (ЭКСФМ и др.) на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании.

Такой подход одновременно обеспечивает и многочисленные «ноу-хау», что наряду с патентной чистотой защитит отечественных производителей на рынке.

Принципиальным отличием разработанных в диссертации методов динамического конструирования от известных является использование вместо линейных математических моделей, численных ЭГД моделей. При этом применяются современные вычислительные среды для расчетного анализа сложных нестационарных трехмерных ЭГД процессов распыла топлива в ЭКСФМ и горения ТВС в модельных и реальных КС авиадвигателей при турбулентных течениях топлива и воздуха.

***На защиту выносятся:***

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

2. Комплекс методов, математических и электрофизических моделей, программно-алгоритмических средств численного анализа ЭГД процессов: сообщения в ЭУВТ электрического униполярного заряда каплям и переноса заряда закрученным потокам топлива; распыла топлива; горения ТВС в модельных и реальных КС газотурбинных авиадвигателей с ЭКСФМ с центробежными и пневматическими форсунками. А также технических решений реализации ЭКСФМ, основанных на результатах суперкомпьютерных ЭГД вычислений с их верификацией экспериментом и технологии Динамического конструирования.

3. Экспериментальные результаты исследований, разработанных электрокаплеструйных методов и технологий повышения эффективности распыла топлива, горения ТВС как на модельных, так и на реальных камерах сгорания современных газотурбинных авиационных двигателях.

***Степень достоверности полученных 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.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались в 18 докладах и обсуждались на Международных конференциях, симпозиумах и форумах: «II Международной научно-технической конференции - Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения». (Севастополь – 2017 г.; «5-й Международной научно-практической конференции - Современное машиностроение: наука и образование (ММЕSE-2016)» (Санкт-Петербург – 2016 г.); «International Conference on Computational Science, ICCS- 2015. (Reykjavik, Iceland – 2015 г.); «XXII, XXI, XX, XVIII, XVII Международной научно-практической конференции - Системный анализ в проектировании и управлении» (Санкт-Петербург – 2018 г., Санкт-Петербург – 2017 г., Санкт-Петербург – 2016 г., Санкт-Петербург – 2014 г., Санкт-Петербург – 2013 г.); «7th International Symposium on Non-Equilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena (NEPCAP 2016)» (Sochi, Russia – 2016 г.); «XI Международной научной конференции - Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (Петергоф – 2015 г.); «Международном форуме «Крым Hi-Tech - 2014»» (Севастополь – 2014 г.); «II Международной научно-практической конференции «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении»» (Санкт-Петербург – 2014 г.); «XVI Международной научной конференции - Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (Украина. Николаев – 2013 г.); «XX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов - Вакуумная наука и техника» (Москва – 2013 г.).

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 38 работ, из них в рецензируемых научных изданиях и приравненным к ним опубликовано 22 работы.

**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 331 наименование.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, определены объект и предмет исследований, цель работы и решаемые научно-технические задачи. Приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, а также сформулированы положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о степени достоверности полученных результатов и их публикациях, апробации работы, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** проведен анализ состояния и путей повышения эффективности процессов распыла и горения углеводородных топлив авиационных двигателей.

Анализ работ позволяет сделать следующие выводы с учетом указанных во введении объекта, предмета, целей и задач исследований.

Применительно к двигателям внутреннего сгорания и различного рода горелкам (а это основная масса публикаций – около 98 %) для повышения эффективности процессов горения бензина, дизельного топлива, мазутов ряд авторов предлагают использовать 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.

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

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

Исследования показали (А.У. Салимов, Н.А. Ефимов, М.М. Акбаров, В.Г. Мурамович, В.С. Нагорный и др.), что сообщение электрического заряда каплям топлива улучшает показатели воспламенения и горения топлив и ТВС, 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 авиадвигателей.

Наиболее целесообразно сообщать униполярный электрический заряд потоку топлива и/или каплям топлива в резко неоднородном электрическом поле между электродами типа «игла–плоскость (сопло)». 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.

Автором даны рекомендации повышения объемной плотности электрического заряда в струе углеводородного топлива конструктивным исполнением электродов. Показано, что можно получить объемную плотность объемной плотности электрического заряда на срезе сопла до  $10^{-1} \text{ Кл/м}^3$ .

Сформулированы показатели и критерии эффективности возможных направлений исследований с учетом того, что объектом исследований и разработок являются ЭКСФМ. При этом ориентируемся на широко используемые в авиадвигателях топливные форсунки: пневматические – для газотурбинных двигателей и центробежные – для турбореактивных двигателей, как элементов ЭКСФМ.

Критерием эффективности функционирования ЭКСФМ является улучшение качества распыла топлива, которое оценивается, в частности, по следующим показателям: минимальному диаметру капель распыливаемого топлива на выходе форсунки, однородностью распределения топлива в ТВС и интегральными показателями улучшения процессов горения ТВС в КС авиадвигателя. Достижение этих критериев и показателей целесообразно осуществлять совершенствованием как конструкции собственно топливной форсунки (как элемента ЭКСФМ), так и способов воздействия электрическими

полями на топливо авиадвигателей в тесной взаимосвязи друг с другом.

Отмечена мировая тенденция широкого использования численных методов с существенным увеличением числа расчетных элементов. При разработке инновационных конструкций ЭКСФМ необходимо предусмотреть возможность верификации экспериментом результатов численного анализа с использованием самого современного оборудования.

При численном моделировании процессов распыла топлива и горения ТВС в математических моделях необходимо применять систему ЭГД уравнений, 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 ЭКСФМ эта задача решается впервые.

Сформулированы задачи, цели, стратегия и методы исследований ЭКСФМ, основанных на разработанной технологии Динамического конструирования.

Основным инструментом для оценки образования и распространения заряженных струй и капель являются современные пакеты численного моделирования, основанные на дополнительном численном решении ЭГД уравнений и уравнений вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса в нестационарной постановке с учетом объемных ЭГД сил.

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 рациональные комбинации известных подходов и моделей повышения точности численных суперкомпьютерных расчетов с учетом особенностей решаемой задачи в современных вычислительных средах (ANSYS Fluent, ANSYS ICEM CFD, ANSYS CFX, OpenFOAM).

В качестве метода численного моделирования межфазного взаимодействия, как правило, используется метод объема жидкости VOF.

Материалы данной главы опубликованы в [32 - 34].

**Во второй главе** представлены электрофизические и экспериментальные основы влияния электрических полей на углеводородное топливо (керосин), сообщения униполярного электрического заряда керосину и каплям топлива.

Известны экспериментальные исследования по влиянию электрических полей на топливо, в которых отмечается относительно большие различия результатов экспериментов от вычисленных по молекулярной теории значений коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения. Введено понятие «эффективная» (наблюдаемая в эксперименте) вязкость рабочей жидкости при воздействии электрического поля, а также «эффективное» поверхностное натяжение униполярно заряженной капли топлива.

Результаты экспериментальных исследований (А.А. Остапенко) воздействия переменных однородных электрических полей высоких напряженностей показали уменьшение эффективного динамического коэффициента вязкости декана, который входит в химический состав углеводородного топлива, от частоты приложенного напряжения при различных величинах напряженности поля между электродами. При изменении частоты прикладываемого напряжения в 100 раз относительная эффективная вязкость декана падает на  $\approx 30\%$ , а с ростом величины приложенного напряжения - величина изменяется менее чем в 1,5 раза.

Экспериментально подтвержден (американские исследователи R. Tao, H. Iang, K. Huang, H. Tang, E Du) эффект последствия продольного постоянного электрического поля на топливо после снятия электрического воздействия. Например, при приложении продольного к потоку дизельного топлива однородного электрического поля напряжённостью 1кВ/мм в течение 2 секунд. после выключения электрического поля вязкость восстанавливается к своему исходному значению в течение более чем 60 минут. При этом наиболее сильное уменьшение вязкости составляет около 10%, а при увеличении напряжённости до 2 кВ/мм вязкость уменьшается на 23%.

Теоретически исследовано автором с учетом имеющихся экспериментальных данных влияние униполярного электрического заряда каплей топлива на уменьшение эффективного поверхностного натяжения каплей. Отмечается простота получения униполярного заряда в топливе – в резко неоднородном электрическом поле между электродами типа игла – плоскость знака потенциала острого электрода. Рассмотрены и обобщены модели влияния электрического заряда на поверхностное натяжение каплей. Автором получена безразмерная формула зависимости эффективного поверхностного натяжения капли топлива от величины униполярного заряда  $q$ , хорошо отображающая результаты экспериментов для углеродных топлив.

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

Здесь  $\alpha_{эф}$  – эффективный коэффициент поверхностного натяжения униполярно заряженной капли топлива, характеризующий уменьшение поверхностного натяжения прежде всего за счет кулоновских сил относительно поверхностного натяжения незаряженной капли  $\alpha_0$ ;  $q$  – величина униполярного заряда капли топлива;  $q_{кр}$  – критический заряд капли по критерию устойчивости Релея.

Выражение (1) положено в основу дальнейших численных расчетов процессов распыла топлива ЭКСФМ и горения ТВС применительно к авиационным двигателям.

Теоретически исследованы в статике и динамике процессы сообщения униполярного электрического заряда каплям топлива в ТВС на выходе ЭКСФМ в поле коронного разряда. Эти исследования проведены применительно к пневматической форсунке для КС богато-бедного типа газотурбинного авиационного двигателя (авиадвигатель пятого поколения ПД-14). Данный

метод сообщения заряда каплям может быть реализован в электродной системе с малым расстоянием между электродами, например, «острая кромка распыливающего сопла – ближайшая внутренняя поверхность внешнего наружного завихрителя». Обосновано применение формулы Нагорного для нахождения начальной напряженности электрического поля возникновения коронного разряда (возникновение униполярного потока ионов). Получено выражение для границы внутренней области короны, вне которой имеет место униполярный поток ионов знака потенциала острого электрода (острой кромки распыливающего сопла). Эту границу необходимо учитывать при конструировании ЭКСФМ с коронным разрядом.

Проведены исследования на основании формулы Потенье и получены соответствующие зависимости динамики сообщения как отрицательного (подвижность отрицательных ионов в воздухе равна  $b^- = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$  при отрицательном потенциале напряжения на острой кромке распыливающего сопла), так и положительного ( $b^+ = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В с})$  при положительном потенциале напряжения на острой кромке распыливающего сопла) электрического заряда каплям топлива различных диаметров с различной диэлектрической проницаемостью.

На основании проведенных исследований автором, в частности, показано:

– вне зависимости от 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 ЭКСФМ;

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

– чем больше относительная диэлектрическая проницаемость авиационного 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;

– с увеличением скорости обтекания воздухом острой кромки распыливающего сопла можно сообщить больший по величине электрический заряд каплям авиационных топлив.

Проведенный библиографический анализ показал, что 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 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 объемно-диссоциационная. Последняя модель применяется, например, к сильно загрязненным диэлектрическим жидкостям. Автором обосновано применительно к технически чистым авиационным топливам (керосину) использование инжекционной модели. Считается, что вблизи игольчатого электрода образуются ионы только одного знака, причём их концентрация настолько мала, что влиянием ионов на физические свойства топлива можно пренебречь. В качестве модели образования ионов у поверхности игольчатого электрода используется модель, в которой плотность тока ионов  $j_{inj}$  задаётся на поверхности игольчатого электрода ЭУВТ выражением

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

где  $\max$  — функция выбора максимального из двух значений. Здесь  $A$  и  $B$  являются константами, которые необходимо определять из эксперимента для рассматриваемой рабочей жидкости. Применительно к керосину таких данных нет, и они впервые были получены автором.

Разработана методология уточнения инжекционной модели образования униполярного потока ионов в керосине в резко неоднородном поле ЭУВТ, как конструктивно реализованном в самой топливной форсунке (ЭПФ), так и в ЭУВТ, включенном в гидравлическую цепь питания непосредственно на входе топлива в форсунку. Данная методология автором реализована на модельной задаче с керосином между электродами типа «игла – плоскость с отверстием» с использованием суперкомпьютерных вычислений в среде ANSYS/CFX на основе метода VOF при сформулированных граничных условиях на базе ЭГД уравнений с последующей верификацией экспериментом окончательных результатов численных расчетов. Отмечается хорошее совпадение (с точностью до 2 %) результатов эксперимента и расчета, что дает основание применять базовые положения разработанных ЭГД моделей при дальнейших исследованиях ЭКСФМ с ЭУВТ.

На основании полученных на модельной задаче результатов разработана расчетная модель и методика численного ЭГД расчета для определения необходимой для корректировки инжекционной модели вольт-амперной характеристики (ВАХ) реальной впервые созданной ЭПФ газотурбинного авиадвигателя, когда ЭУВТ конструктивно реализуется в самой топливной форсунке (рисунок 1).

Для уточнения коэффициентов инжекционной модели создания потока униполярных ионов в керосине применительно к реальной ЭПФ (см. рисунок 1) разработана и реализована методология верификации экспериментом результатов расчета ВАХ. Она предусматривает: точное численное моделирование геометрии межэлектродного промежутка с заданием материала

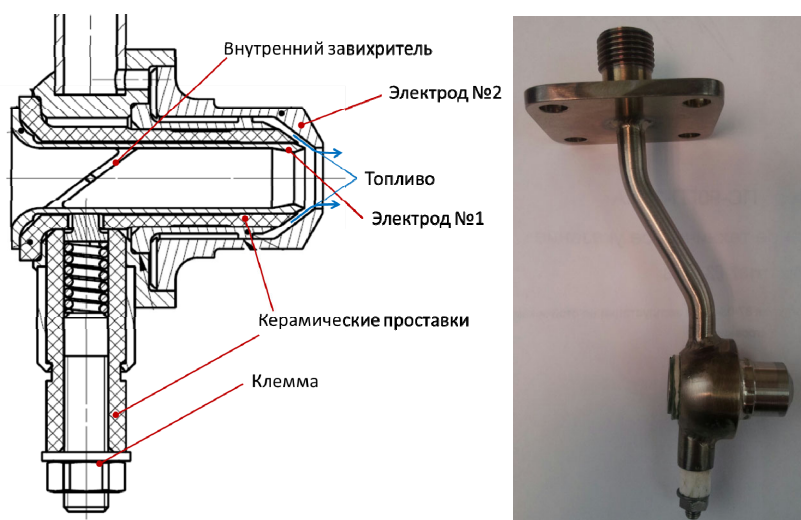


Рисунок 1 – Впервые разработанная и изготовленная электропневматическая форсунка применительно к газотурбинному авиадвигателю пятого поколения типа ПД-14

электродов и физико- химических параметров керосина в диапазоне изменения температуры при работе авиадвигателя на различных режимах; экспериментально снятие ВАХ реальной конструкции ЭПФ; для заданных (выбранных) значений коэффициентов  $A$  и  $B$  в уравнении инжекции численное решение системы ЭГД уравнений при соответствующих граничных условиях; нахождение расчетной ВАХ ЭПФ – когда численное решение ЭГД уравнений 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; сравнение расчетной (на этом шаге) ВАХ с экспериментально снятой и в случае их отличия корректировку значений коэффициентов  $A$  и  $B$  в уравнении инжекции и проведение численное решение системы ЭГД уравнений при скорректированных граничных условиях до тех пор, пока сравнительные результаты расчета и эксперимента для ВАХ ЭПФ не обеспечат допустимую (требуемую) точность; нахождение таким образом окончательные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  в уравнении инжекции.

В результате для керосина автором получены новые значения коэффициентов:  $A = 2,25 \cdot 10^{-10}$  Кл/(В·м·с),  $B = 0,6 \cdot 10^{-3}$  Кл/(м<sup>2</sup>·с) для скорректированной таким образом инжекционной модели создания униполярного электрического заряда знака игольчатого электрода в ЭПФ, которые использованы при дальнейших исследованиях ЭГД процессов распыла и горения керосина.

Разработанная методология корректировки инжекционной модели создания потока униполярных ионов в керосине в ЭПФ 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 ВАХ данного ЭУВТ с выбранным типом углеводородного топлива.

Инжекционная модель необходима при численном моделировании исследуемых процессов распыла топлива и горения ТВС для задания граничных условий на игольчатом электроде. 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 автор учитывает при задании граничных условий у острого электрода, в том числе существенным сгущением 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.

Материалы данной главы опубликованы в [3, 8, 25, 26, 18-20].

**В третьей главе** разработаны методы построения электрокаплеструйных форсуночных модулей применительно к авиационным двигателям.

На основании сформулированных критериев и показателей эффективности направлений исследований по разработке ЭКСФМ предложена стратегия и методология исследований и разработок ЭКСФМ с пневматическими и центробежными форсунками, основанная на разработанной технологии Динамического конструирования, применительно к газотурбинным авиационным двигателям. ЭУВТ могут быть включены в гидравлическую цепь питания топливной форсунки, при этом конструкция форсунки остается штатной или доработанной с позиций обеспечения требуемых параметров распыла топлива. ЭУВТ могут являться конструктивным элементом (ее электродная часть) топливной форсунки (например, пневматической – см. рисунок 1), причем необходимо стремиться в одном конструктивном устройстве реализовать функции пневматической (напряжение на электродах отсутствует) и электропневматической (наличие на электродах напряжения) форсунок. Геометрические размеры и расходная характеристика ЭПФ должны соответствовать форсунке данного типа авиадвигателя (в нашем случае – авиадвигатель пятого поколения ПД-14). Применяемые материалы и уплотнения должны обеспечивать надежную работу ЭПФ при температуре воздуха до 600 градусов Цельсия и перепаде давления по топливу до 25 атм.

Электрическое поле, создаваемое в топливе между электродами ЭУВТ, может быть однородным переменным, резко неоднородным постоянным и переменным с изменяющейся частотой.

На основе созданной автором методологии разработаны принципиально новые методы улучшения показателей распыла керосина и керосино-воздушной смеси в авиадвигателях, а также ЭКСФМ, защищенные патентами РФ [20–22, 24–26].

Показано, что 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 разработана и реализована технология получения и обработки электроизоляционных керамических деталей ЭПФ из корундоциркониевой

керамики. Разработанные технологии представляют самостоятельный научный и практический интерес не только для авиадвигателестроения, но и для других отраслей промышленности.

Разработана технология реализации резко неоднородного электрического поля в новых конструктивных решениях ЭПФ для получения очень малых радиусов закругления игольчатых электродов (до 1–3 мкм) напылением тонкой пленки из тугоплавкого металла на соответствующие детали ЭПФ.

Предложены методы обеспечения пожаровзрывобезопасности, электробезопасности обслуживающего персонала и повышения быстродействия ЭУВТ при конструктивной реализации электродной системы в ЭПФ для создания резко неоднородного электрического поля с целью получения униполярного потока ионов. Эти методы реализованы в разработанных и изготовленных принципиально новых ЭПФ с обеспечением выходной электрической мощности не более единиц ватт, внутренней электробезопасности и схемных решений.

Материалы данной главы опубликованы в [16 – 18, 20 – 22, 12 – 13, 37].

**В четвертой главе** представлены результаты исследований, разработанных математических и численных ЭГД моделей процессов инжекции и переноса униполярного электрического заряда закрученным потоком керосина в ЭКСФМ применительно к турбореактивным авиадвигателям.

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 топливно-воздушной смеси в камере сгорания.

Выполнен аналитический обзор литературы в области численного моделирования ЭГД процессов в струях и потоках диэлектрических жидкостей. Разработаны математические модели воздействия электрических полей в ЭКСФМ на закрученные потоки керосина на основе системы ЭГД уравнений. Обобщены возможности пакетов численного моделирования при решении задач сообщения и распределения заряда в потоке топлива.

Впервые автором разработана применительно к турбореактивным авиадвигателям конструктивная модель ЭКСФМ с ЭУВТ внутри топливной форсунки. Ее выходная часть, габаритные и присоединительные размеры соответствуют штатной форсунке в камере подогрева стартер воздушно-газовый турбореактивного авиадвигателя. Инжекция в закрученный поток керосина униполярного заряда происходит в резко неоднородном поле между электродами: заостренная по внутреннему диаметру шайба и плоская незаостренная шайба. При этом шайбы для уменьшения гидравлического сопротивления потоку конструктивно не выступают в топливный канал, а электроды отделены керамическими изоляторами. Непосредственно перед входом потока топлива в канал, образованный электродной системой и соплом, расположен трехпазовый аксиальный топливный завихритель для закрутки потока керосина.

Разработана (с позиций увеличения точности расчетов) методология

численных исследований рассматриваемых процессов. Используется система ЭГД уравнений для описания нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в изотермическом несжимаемом топливе без учета влияния магнитных полей. Система ЭГД уравнений включает в себя: уравнение неразрывности потока; уравнение баланса импульса в топливе с учетом вязких и турбулентных составляющих; уравнение сохранения заряда с учетом ионного и турбулентного коэффициентов диффузии с турбулентным числом Шмидта  $Sc_t = 0,9$ , обеспечивающим приемлемую точность расчетов; интегральное уравнение переноса заряда; уравнение Пуассона для потенциала. Сформулированы граничные условия и модель турбулентности. Для гидродинамики они стандартные (на входе задается входной поток, на выходе — фиксированное давление, на стенках ставится условие прилипания). Для границ области, представляющей собой электроды, задается разность электрических потенциалов. В качестве модели образования ионов у поверхности игольчатого электрода применена уточненная инжекционная модель. При этом считаем, что все ионы, попадающие на незаостренный электрод, нейтрализуются.

Численное решение системы ЭГД уравнений проведено в открытом программном пакете OpenFOAM версии 2.3 с применением метода VOF. Существующие решатели в OpenFOAM были доработаны для возможности учета ЭГД эффектов. Используемая модель турбулентности  $k-\omega$  SST доработана введением поправки на кривизну линий тока в закрученном потоке топлива в ЭКСФМ.

При решении системы дискретных линейризованных уравнений сохранения массы и импульса использовалась итерационная процедура, в качестве сеткопостроителя – открытый программный пакет SALOME версии 7.4, позволяющий строить неструктурированные сетки со сложной топологией расчётной области. Для обработки результатов расчета использовались открытый пакет ParaView 4.1 и программа для построения графиков gnuplot 4.6.

Разработана методология упрощения численных расчетов рассматриваемых в модельном ЭКСФМ процессов. Задача оценки максимального униполярного электрического заряда, выносимого закрученным потоком керосина из форсунки модельного ЭКСФМ, решается в два этапа. Вначале на первом этапе проводится в нестационарной постановке по методу RANS трехмерный расчет турбулентного течения керосина ТС-1 с учетом топливного завихрителя (без электрического поля). Наличие завихрителя в ЭКСФМ учитывается путем постановки специальных входных граничных условий. Для адекватного задания граничного условия оцениваются параметры потока топлива за завихрителем для геометрии завихрителя, приближенной к реальной в турбореактивных авиадвигателях. Параметры течения в расчете соответствовали натурным экспериментам, в качестве топлива использовался авиационный керосин ТС-1, расход через ЭКСФМ был фиксирован и равен 40 л/час. Показано, что на некотором удалении от аксиального топливного завихрителя течение является практически осесимметричным, профили скорости непосредственно за завихрителем могут быть аппроксимированы к

гауссовым распределением. Определен параметр закрутки потока керосина как отношение максимальной азимутальной скорости к максимальной осевой скорости, потока и отмечена высокая степень закрученности потока керосина в ЭКСФМ. На втором этапе полученные результаты первого этапа использовались в качестве «опорных» данных при проведении многовариантных расчетов течения керосина и переноса униполярного электрического заряда в ЭКСФМ с учетом электрического поля.

В результате обработки результатов численных расчетов первого этапа получены аналитические выражения для компонент скорости закрученного потока керосина в непосредственной близости от паза аксиального топливного завихрителя ЭКСФМ. Данные выражения являются входными граничными условиями при численном анализе ЭГД процессов в осесимметричной задаче переноса электрического заряда на втором этапе расчетов:

$$V_{\phi}(R) = 2 + 5.6 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{10^{-7}}\right), \quad (2)$$

$$V_z(R) = 1.8585 \exp\left(-\frac{(R - 2.06 \cdot 10^{-3})^2}{7 \cdot 10^{-8}}\right). \quad (3)$$

В выражениях (2), (3)  $V_z$  и  $V_{\phi}$  — осевая и азимутальная компоненты скорости в зависимости от расстояния  $R$  от оси ЭКСФМ. Радиальная компонента скорости  $V_R$  в данном расчете полагалась равной 0. Получаемый в расчете объемный расход керосина на входе в расчетную область с заданным по формуле (3) профилем осевой скорости равен 40.54 л/час (исходный заданный расход керосина 40 л/час). Последнее подтверждает достоверность расчетов по первому этапу и соответствует штатной форсунке в камере подогрева стартер воздушно-газовый турбореактивного авиадвигателя.

Показано, что по разработанной методологии расчета существенно упрощаются на втором этапе численные расчеты переноса электрического заряда в ЭКСФМ. Это продемонстрировано при решении осесимметричной задаче переноса электрического заряда в ЭКСФМ применительно к турбореактивным авиационным двигателям.

Установлено, что за счет интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки электрического заряда достигает около 80% инжестируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный поток керосина. Численно исследовано влияние расположения игольчатого электрода относительно изолирующей шайбы и степени закрутки керосина на количество выносимого заряда закрученным потоком на выходе форсунки ЭКСФМ. Даны рекомендации по оптимизации конструкции ЭКСФМ применительно к турбореактивному авиационному двигателю.

Исследовано влияние различных вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности потока топлива в ЭКСФМ на результаты численных расчетов. Выполнено трехмерное ЭГД моделирование закрученного

течения керосина ТС-1 в данном модельном ЭКСФМ при помощи вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности (IDDES и PLES). Установлено, что при осесимметричном расчете среднее количество электрического заряда в потоке топлива на выходе из форсунки ЭКСФМ и электрический ток занижены примерно на 10% по сравнению с трехмерным моделированием.

Материалы данной главы опубликованы в [1, 14, 30].

**В пятой главе** представлены результаты исследований разработанных математических моделей и численных ЭГД моделей процессов переноса униполярного электрического заряда в базовом ЭУВТ и ЭПФ закрученным потоком керосина и распыла керосина в ЭКСФМ применительно к газотурбинным авиационным двигателям. При этом использовалась уточненная инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в 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. Проведена верификация экспериментом результатов численных расчетов.

Рассмотрены ЭГД процессы при реализации разработанного метода повышения эффективности распыла и горения топлива с включение ЭУВТ в цепь питания топливной форсунки. При этом можно использовать штатную (или доработанную) топливную форсунку авиадвигателя. Причем этот метод применим для любых типов авиационных двигателей (турбореактивных, газотурбинных).

Выбрано для дальнейших исследований базовое ЭУВТ (см. рисунок 3) с поперечным к потоку керосина ТС-1 резко неоднородным электрическим полем на основании впервые проведенных в СГАУ экспериментальных исследований, изготовленных различных конструктивных исполнений ЭУВТ и электрических блоков питания (БП) на распыл керосина и горение керосино-воздушной смеси в модельной КС газотурбинного авиадвигателя.

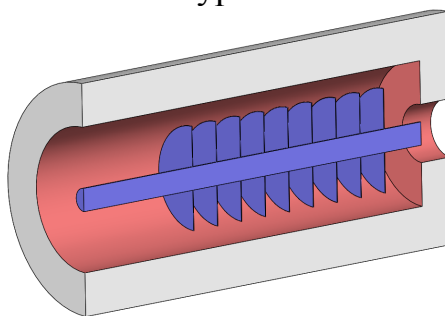


Рисунок 2 – Упрощенная численная геометрическая модель базового ЭУВТ в цепи питания топливной форсунки авиационного двигателя

Проточная часть базового ЭУВТ представляет собой цилиндрический канал, внутри которого помещена цилиндрическая спиралевидная щетка из игольчатых электродов, на которую подается положительное электрическое напряжение с выхода электрической части ЭУВТ. Вторым электродом является корпус ЭУВТ, соединенный с «землей». При подаче электрического

напряжения на электроды с игольчатых электродов происходит инжекция в поток топлива положительно заряженных ионов, которые под действием электрических сил двигаются к противоположному электроду, захватываются потоком керосина и поступают в форсунку.

Для инженерных расчетов созданы и исследованы с позиций оценки величины выносимого заряда упрощенные геометрические модели проточного канала базового ЭУВТ. В качестве примера по одной из них [29] щетка-электрод была заменена на игольчатые диски из однонаправленного пористого материала. Пористость материала задается как линейная функция, меняющаяся от центра диска к его краю от 0% до 70% (рисунок 2).

Диаметр стержня при этом с учетом реальной конструкции принимался равным 4 мм, диаметр дисков  $d_2 = 18$  мм, всего 9 дисков толщиной 0,1 мм, расстояние между дисками 5,25 мм. Общая длина расчетной области 80 мм. На игольчатый электрод (синий цвет) подается положительный потенциал. Другой электрод (красный цвет) заземлен (имеет нулевой потенциал). Массовый расход керосина на входе в канал задан 0.00725 кг/с. В дальнейшем под ЭУВТ будем подразумевать базовый ЭУВТ.

Показана (на примере задачи переноса электрического заряда потоком топлива в ЭУВТ, ЭПФ) возможность использования с соответствующей доработкой для численных исследований рассматриваемых ЭГД процессов также широко распространенного пакета численного моделирования ANSYS/CFX, несмотря на то, что среди встроенных в пакет ANSYS/CFX уравнений нет ЭГД уравнений.

Разработана автором методология численного моделирования рассматриваемых ЭГД процессов в базовом ЭУВТ и ЭПФ.

Для описания изотермического нестационарного турбулентного течения и переноса заряда в потоке керосина в ЭУВТ использовались основные ЭГД уравнения, в том числе учитывающие знак, концентрацию и рекомбинацию ионов в потоке топлива. Граничные условия образования униполярных ионов в потоке с концов игольчатых электродов задавались уточненной инжекционной моделью, а на противоположном электроде (корпусе) полагается нейтрализация всех попадающих ионов. По всем границам, отвечающим непроницаемым стенкам, ставится условие равенства нулю всех компонент вектора скорости. Расчет проводился в осесимметричной постановке в пакете численного моделирования ANSYS/CFX на основе метода VOF с использованием итерационной процедуры, когда на каждом шаге по времени последовательно решались уравнения гидродинамики и электродинамики. Эффект турбулентности моделируется с использованием различных моделей турбулентности (SST,  $k-\epsilon$ ). При численном моделировании использовалась структурированная гексагональная сетка со сгущением в области игольчатых электродов. Для учета пограничного слоя введено сгущение на границах непроницаемых стенок.

Определены распределения и величины объемной плотности электрического заряда на выходе ЭУВТ и ЭПФ (рисунок 1) для их дальнейшего использования для расчета коэффициента поверхностного натяжения



заряженных капель по (1) керосина при расчете распыла топлива ЭКСФМ. Проведена сравнительная оценка результатов численных расчетов процессов переноса электрического заряда в ЭУВТ и ЭПФ. 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. Показано, что абсолютная величина объемной плотности заряда существенно ниже (более чем на два порядка) максимально возможной, что открывает пути дальнейшего совершенствования как ЭУВТ, так и ЭПФ, однако даже при такой величине заряда, как показали дальнейшие исследования, можно улучшить параметры распыла керосина и сгорания керосино-воздушной смеси.

Отмечается, что в ряде случаев целесообразно для получения суммарного повышения эффективности распыла и горения включение в цепь питания ЭПФ непосредственно на ее входе ЭУВТ.

Разработаны методика, математические модели и методы численного ЭГД расчета распыла топлива в Эйлеровой постановке с подключенным уравнением баланса популяций с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Рассмотрены два случая – с включением ЭУВТ в цепь питания ЭОФ (доработанной с позиций динамического конструирования пневматической форсунки применительно к газотурбинному авиадвигателю пятого поколения ПД-14 [4, 26, 31]), а также ЭПФ. Для обоих случаев выполнены расчеты распыла топлива с подачей электрического напряжения и без подачи электрического напряжения на электроды форсуночного модуля, что обеспечивает объективный анализ влияния электрических полей.

В ANSYS Fluent для решения уравнений теоретических моделей, также, как и в ANSYS CFX использован метод VOF с учетом его характерных отличий, когда контрольные объемы (КО) не создаются вокруг узлов, а используются существующие элементы расчетной сетки. Исходные дифференциальные уравнения преобразуются в алгебраические и интегрируются по каждому КО, после чего объемные интегралы заменяются поверхностными. Значения всех величин определяются в центрах элементов, а для вычисления поверхностных интегралов используются значения в центрах граней элементов. Согласно используемой схеме первого порядка точности значения на гранях принимаются равными значению в центре элемента, расположенного выше по потоку (исходя из текущего поля скорости).

Влияние электрического заряда капли топлива на ее дробление воздушным турбулентным потоком в математических моделях учитывается полученным выражением (1) для поверхностного натяжения заряженной капли, в котором критический заряд капли определяется через диаметр капли топлива, диэлектрическую проницаемость и поверхностное натяжение незаряженной капли топлива. Для замыкания используемых уравнений при RANS расчетах (осреднения по Рейнольдсу) применена SST модель турбулентности (линейная комбинация  $k-\omega$  модели и  $k-\varepsilon$ , записанной в терминах  $k-\omega$ ). Увеличение

точности расчетов течения потока в пограничном слое вблизи твердых стенок ЭКСФМ при изотропном характере турбулентности достигается введением ограничения на турбулентную вязкость. Параметром, определяющим взаимодействие фаз (топливо – воздух), является средний заутеровский диаметр дисперсной фазы  $d_{32}$ , равный отношению момента функции распределения 3-его порядка к моменту 2-ого порядка. Он вычисляется с использованием уравнений баланса популяций, а также уравнения для функции распределения по диаметрам капель топлива [4,15, 10].

Обобщены данные численных вычислений распыла керосина ЭКСФМ.

В частности, при рассмотрении распыла топлива ЭКСФМ - «ЭУВТ в цепи питания + ЭОФ») отмечены следующие результаты. Эффективность и общность разработанной технологии динамического конструирования продемонстрирована на примере конструирования ЭОФ с улучшенными характеристиками распыла топлива относительно штатной форсунки как элемента ЭКСФМ (а не только конструирования ЭКСФМ). При этом все указанные во введении характерные для динамического конструирования пункты выполнены, в том числе изготовление в АО «ОДК – Авиадвигатель» по результатам численных расчетов ЭОФ [4, 10, 15] и их экспериментальное исследование на современном оборудовании в СГАУ. Разработана методика расчета двухфазных потоков при распыле топлива таким ЭКСФМ. Данная методика позволяет эффективно численно оценивать влияния конструктивных и газогидродинамических параметров потоков на распыл топлива, что продемонстрировано, в частности, на примере влияния угла закрутки газового потока на распыл топлива ЭКСФМ с ЭОФ [10]. Разработаны методы повышения точности математических и численных моделей распыла топлива. Проведен сравнительный анализ результатов численных экспериментов для различных математических моделей (VOF и QMOM) с результатами экспериментальных исследований [15]. Показано, что модель QMOM обеспечивает повышенную точность расчетов (например, угла распыла на выходе форсунки) и позволяет вычислить заутеровский диаметр капель топлива при существенной экономии вычислительных ресурсов по сравнению с моделью VOF. Хотя, как отмечено выше, можно успешно использовать модель VOF для решения конкретных задач. Экспериментально измерены характеристики распыла ЭОФ воды с давлением  $10^6$  Па и воздуха  $3 \cdot 10^3$  Па для ЭОФ на модельном продувочном устройстве в АО «ОДК-Авиадвигатель». Показано [38], что при воздействии электрических полей на керосин при рабочих давлениях керосина и воздуха, характерных для авиадвигателей, в ЭКСФМ «ЭУВТ + ЭОФ» обеспечивается в реальных условиях работы газотурбинных авиационных двигателей среднезаутеровский диаметр капель керосина меньше 35 мкм. Установлено с учетом проведенных численных расчетов [4], что для повышения их точности целесообразно использовать модель LES, которая, несмотря на большие вычислительные ресурсы, позволяет получать наиболее приемлемые результаты.

Выполнено численное моделирование процесса распыла топлива в форсуночном модуле с ЭОФ и ЭПФ. Оценено влияние сообщения заряда

топливу на распределение диаметров капель. Расчеты полных моделей методом VOF позволили определить распределение скоростей в каналах форсуночных модулей и завихрителя, которые затем были использованы как граничные условия при расчете упрощенных моделей.

Проведена верификация экспериментом основных положений теоретических моделей при численном моделировании процессов распыла топлива в ЭКСФМ. Расчеты в Эйлеровой постановке с подключенным уравнением баланса популяций позволили определить распределение диаметров капель в потоке за форсункой. Установлено, что снижение коэффициента поверхностного натяжения капель при сообщении им униполярного электрического заряда приводит к снижению диаметров капель топлива по всему конусу распыла. Экспериментально подтверждены базовые положения теоретических моделей.

Материалы данной главы опубликованы в [4, 10, 17, 2, 3, 27, 30, 35, 36, 38].

**В шестой главе** разработаны и исследованы математические модели и методы численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в КС с базовым ЭУВТ в цепях питания форсунок [2, 5, 6, 9, 23, 31, 32]. Проведена верификация экспериментом их результатов при огневых испытаниях ЭКСФМ на модельной КС с центробежной форсункой (в СГАУ – рисунок 3, слева) и реальной КС авиадвигателя ПД-14 с ЭОФ (в АО «ОДК – Авиадвигатель – рисунок 3, справа).

Разработанная с позиций динамического конструирования методология численного моделирования процесса горения керосино-воздушной смеси показана на примере модельной КС экспериментального стенда СГАУ для огневых испытаний. В соответствии с этим построена численная

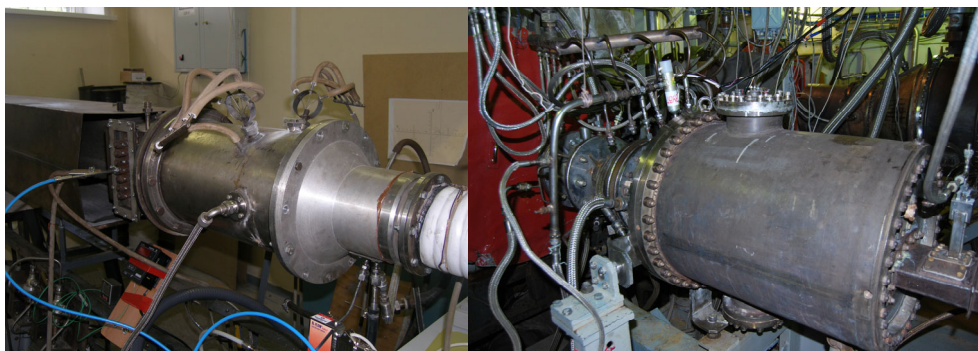


Рисунок 3– Огневые испытания ЭКСФМ с центробежной форсункой и ЭОФ: слева – в СГАУ, модельная камера сгорания; справа – в АО «ОДК-Авиадвигатель», пятигорелочный отсек КС авиадвигателя ПД-14 (вверху с красной надписью – базовый ЭУВТ)

геометрическая модель модельной КС СГАУ и разработана расчетная численная модель процессов горения в Лагранжевой постановке при дроблении капель топлива, основанная на базовой системе уравнений с использованием SST модели турбулентности, реализованной в пакете численного моделирования ANSYS/CFX. Испарение инжектированной топливно-

капельной среды учитываются моделью испарения капель с определением точки кипения с помощью уравнения Антуана. Граничные условия задаются в соответствии с экспериментом, проведенным на огневом стенде СГАУ. На границе входа в расчетную область массовый расход воздуха равен 0.583 кг/с с температурой 150 С. На выходе из КС статическое давление равно 1 атм. В рамках проведенного численного моделирования на супервычислительном комплексе СПбПУ изучалось при горении в диффузионном режиме химическое взаимодействие окислителя с керосином. В качестве окислителя использовалась смесь компонентов газов кислород  $O_2$  – 23.3%, азот  $N_2$  – 76.7%, а керосин рассматривался с приближенной формулой  $NC_{10}H_{22}$ .

С учетом сложности электрофизических и электрохимических ЭГД процессов первичный распыл топлива на непосредственном выходе из форсунки не моделировался. Вместо этого внутри модельной КС на расстоянии 30 мм от сопла форсунки (на этом расстоянии измерялись в эксперименте параметры распыла [23]) в расчетной модели задавались углы факела распыла, размеры капель керосина и скорости их движения, впервые полученные в эксперименте для центробежной форсунки [23]. При подаче напряжения на ЭУВТ в эксперименте угол распыла увеличивался, а диаметры капель уменьшались. Согласно эксперименту, расход керосина принимался равным 5,79 г/с. Впервые проведен сопоставительный численный анализ влияния электрических полей на рассматриваемые процессы. Для этого вводились в расчетную модель соответствующие экспериментальные данные [23] без подачи электрического напряжения на электроды ЭУВТ (база для сравнения), а потом - с электрическим напряжением на электродах ЭУВТ при прочих одинаковых режимах работы форсунки. При этом в расчетной модели было введено несколько упрощений и допущений в виду отсутствия точной информации: массовый расход топлива одинаков по всей зоне распыла; температура капель равна температуре керосина на входе 25 °С; стенки модельной ЕС считаются теплоизолированными. Так как химический состав используемого в эксперименте керосина 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.

Численные расчеты показали, что при электрическом напряжении на электродах ЭУВТ температура горения (максимальная, средняя) в модельной КС газотурбинного авиадвигателя становится больше относительно случая его отсутствия. Например, расчетная температура газа на выходе КС при наличии напряжения на ЭУВТ по сравнению с базой увеличивается почти на 10 %. Это значение выше наблюдаемого при эксперименте в СГАУ, что можно объяснить приближенной численной моделью сгорания.

Разработаны методики и впервые проведены экспериментальные исследования процессов горения в модельной КС на современном компьютеризированном лазерно-оптическом оборудовании СГАУ с использованием ЭКСФМ с центробежной форсункой [2, 5, 6, 9, 33, 34]. Огневые испытания показали, что использование ЭКСФМ: повышает среднюю

и максимальную температуру газа на выходе газосборника КС соответственно на 4,09 % и 4,88 % и снижает неравномерность поля температур газа на 10,34 % относительно базы.

Проведена верификация экспериментом результатов численного моделирования и подтверждены базовые положения теоретических моделей.

Разработаны математические модели и методы численного расчета сопряженного теплообмена в ЭОФ (как элемента ЭКСФМ с ЭУВТ) при горении. Разработаны методики экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных по влиянию резко неоднородных электрических полей в цепи питания ЭОФ на процессы горения керосино-воздушной смеси в реальных КС газотурбинных авиадвигателей применительно к авиадвигателю пятого поколения типа ПД-14. Впервые получены результаты огневых испытаний таких ЭКСФМ с пневматической форсункой на пятигорелочном отсеке КС двигателя ПД-14 в АО «ОДК-Авиадвигатель». Показано, что при воздействии на керосин в цепи питания ЭОФ переменного электрического поля с изменяющейся амплитудой и частотой на режиме малого газа работы авиадвигателя происходит уменьшение СО и концентрации несгоревших углеводородов НС в исходящих продуктах горения соответственно на 10,61% и 57,3% по сравнению с базой.

Все вышеперечисленное свидетельствует, что при использовании разработанных ЭКСФМ как с пневматическими, так и центробежными форсунками в авиадвигателях об улучшении параметров распыла керосина и увеличении полноты сгорания керосино-воздушной смеси при воздействии электрических полей на топливо.

Материалы данной главы опубликованы в [2, 5, 6, 9, 33, 34].

В **заключении** диссертации сформулированы основные научные и практические результаты, полученные на основе проведенных исследований.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, более эффективного управления дисперсностью топлив, процессами образования, воспламенения и горения топливно-воздушных смесей в авиационных двигателях. Это достигнуто путем разработки теории и методов численного ЭГД моделирования и конструирования на базе суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом на современном оборудовании эффективных узлов распыла топлива (ЭКСФМ) авиационных двигателей выбором их рациональных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей. При этом единой методологической основой являются разработанная технология Динамического конструирования, а также теоретические ЭГД модели рассматриваемых процессов, теоретические и экспериментальные методики и инструментальные средства.

Предложены научно обоснованные технические и технологические решения при реализации разработанных новых эффективных

электрокаплеструйных форсуночных модулей и технологий, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Поставленные цели достигнуты и успешно решены все поставленные задачи.

Разработан, теоретически исследован с верификацией экспериментом и обобщен целый ряд принципиально новых ЭКС методов распыла топлива, горения ТВС в КС авиадвигателей. Последнее в сочетании с разработанными численными моделями и основными полученными теоретическими и экспериментальными результатами представляет весьма универсальный аппарат теоретического и практического анализа и синтеза разработанного нового класса форсуночных модулей (ЭКСФМ) и ЭКС технологий. Он определяет дальнейшие пути целенаправленного поиска частных электрокаплеструйных методов (см, например, [19, 31, 36]).

Новыми являются большинство полученных в диссертации результатов, поскольку большинство методов и ЭКСФМ применительно к авиационным двигателям исследовано и разработано впервые. Их мировая новизна и практическая значимость подтверждена 7 патентами РФ [16 - 22].

Основные полученные автором результаты.

1. Разработана стратегия исследований и предложены обобщенные методологические принципы разработки конструкций ЭКСФМ, позволяющие выполнить их в модульно-блочном исполнении, упорядочить и идейно объединить теоретический анализ влияния основных параметров на статические и динамические характеристики рассматриваемых устройств. Сведена к минимальному базовому набору конструктивных и электрических блоков реализация наиболее перспективных принципов построения ЭКСФМ.

2. Впервые применительно к газотурбинным авиационным двигателям (на примере современного авиадвигателя пятого поколения типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения топливно-воздушной смеси с использованием резко неоднородных постоянных и переменных электрических полей и их совместного использования.

3. 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 в КС.

4. Разработаны методы повышения эффективности электризации углеводородных топлив и ТВС и математические модели ЭГД процессов сообщения униполярного электрического заряда углеводородным топливам в резко неоднородном электрическом поле ЭУВТ. Проведен анализ физических моделей образования заряда в потоке топлива и предложено для дальнейших численных исследований принять уточненную для керосина на базе проведенных экспериментов инжекционную модель.

5. Разработаны численные модели (с учетом уточненной инжекционной модели и полученной математической модели влияния электрического заряда на поверхностное натяжение капли керосина):

- ЭГД процессов образования униполярного заряда в резко неоднородном электрическом поле вблизи поверхности электрода типа «игла» и его распространения в закрученном потоке керосина применительно к турбореактивным авиационным двигателям;
- 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 КС авиационного газотурбинного двигателя.

6. Разработана численная ЭГД модель ЭКСФМ применительно к турбореактивным авиадвигателям, в котором электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки. Проведено (с использованием вихререзающих подходов для моделирования турбулентности DES и LES) трехмерное численное моделирование закрученного топливным завихрителем турбулентного течения керосина как без, так и с учетом ЭГД взаимодействия и выявлены гидродинамические закономерности течения потока, используемые в дальнейших исследованиях. Показано, что количество выносимого из форсунки униполярного заряда достигает около 80% инжектируемого с игольчатого электрода заряда. Последнее подтверждает эффективность принятых конструктивных решений для электризации топлива. Исследовано влияние конструктивных параметров и степени закрутки керосина на количество выносимого из форсунки заряда и даны рекомендации по дальнейшей оптимизации конструкции ЭКСФМ.

7. Теоретически исследованы в статике и динамике процессы сообщения униполярного электрического заряда каплям углеводородных топлив в поле коронного разряда в ЭКСФМ. Сформулированы требования (по результатам исследований) к скорости и параметрам каплей углеводородных топлив с различными диэлектрическими проницаемостями для обеспечения их максимального как положительного, так и отрицательного заряда в электрическом поле коронного разряда ЭКСФМ.

8. Решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей рассматриваемых нестационарных процессов, характерных для авиадвигателей, с целью получения наибольшего совпадения результатов суперкомпьютерных вычислений с экспериментальными данными на современном оборудовании.

9. На основании проверенных экспериментом разработанных численных ЭГД моделей проведены и обобщены численные исследования влияния конструктивных, электрогидроаэродинамических, гидродинамических, электрических параметров на характеристики распыла и горения, даны рекомендации по выбору и выбраны рациональные параметры ЭКСФМ. Предложены пути их дальнейшего совершенствования.

10. Эффективность такого подхода при динамическом конструировании продемонстрирована на примере оптимизированного при различных режимах

работы авиадвигателя образца экспериментальной пневматической форсунки для газотурбинного авиадвигателя ПД-14 (ЭОФ), как элемента ЭКСФМ.

11. Созданы, конструктивно проработаны и впервые изготовлены (на основании результатов численных 3D CFD расчетов) экспериментальные образцы ЭКСФМ (ЭПФ) с электродной системой ЭУВТ внутри форсунки, 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. Ее состав – оксид алюминия  $Al_2O_3$  – 95% и диоксид циркония  $ZrO_2$  – 5%. Впервые разработаны технология получения и обработки изоляционных керамических деталей ЭПФ из корундоциркониевой керамики, которая представляет самостоятельный научный и практический интерес не только для авиадвигателестроения, но и для других отраслей.

12. При впервые проведенных огневых испытаниях в СГАУ и АО «ОДК – Авиадвигатель» по разработанным методикам влияния ЭГД, конструктивных и электрических параметров ЭУВТ на распыл керосина и горение керосино-воздушной смеси на современном оборудовании в составе разработанных конструкций ЭКСФМ с центробежной и пневматической форсунками как на модельных, так и на реальных КС авиадвигателей экспериментально подтверждено, что использование электрических полей в форсуночных модулях позволяет улучшить характеристики распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси в КС авиационного газотурбинного двигателя, что приводит к снижению эмиссии вредных веществ:

- средние диаметры капель при наличии электрического поля оказываются меньше, чем для «базы» на 8 % (когда электрическое напряжение на электродах ЭУВТ отсутствует);

- с увеличением перепада давления по воздуху угол топливного факела при наличии электрического напряжения на электродах ЭКСФМ увеличивается относительно базы (до 36,4 %), причём, чем больше перепад давления по топливу, тем менее значительно это увеличение;

- повышается средняя и максимальная температура газа на выходе газосборника КС на 4,09 % и 4,88 % относительно базы, соответственно;

- снижается неравномерность поля температур газа на выходе газосборника КС на 10,34 % относительно базы;

- установлено, что при огневых испытаниях ЭКСФМ на пятигорелочном отсеке реальной КС газотурбинного авиадвигателя пятого поколения 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 и несгоревших углеводородов НС в исходящих продуктах горения на 10,61% и 57,3%, соответственно, по сравнению с базой без электрического поля. Все это свидетельствует об улучшении параметров распыла топлива и увеличении полноты сгорания топлива;



– показано, что разработанные ЭКСФМ при подаче электрического напряжения на электроды ЭУВТ обеспечивают среднезаулеровский диаметр капли керосино-воздушного аэрозоля меньше 35 микрон при работе авиационного газотурбинного двигателя в реальных условиях.

Причем эти данные экспериментов получены впервые применительно к авиационным газотурбинным двигателям.

13. Совокупность полученных результатов составляет научные основы расчета и современного конструирования эффективных ЭКСФМ.

14. Предложенные методы расчета и проектирования ЭКСФМ использованы в АО «ОДК-Авиадвигатель» при разработке конструкторской документации и изготовлении ЭОФ и ЭПФ (как элементов ЭКСФМ) с дальнейшей верификацией экспериментом.

15. Подтверждены базовые положения теоретических моделей путем сравнительного анализа результатов численных расчетов и экспериментов, проведенных на современном лазерно-оптическом и другом оборудовании. 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.

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, ПС-90А, ПД-35.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях**

1. 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.  
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. Chernyshev // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41, No. 4. P. 859-862.
2. Колодяжный Д.Ю. Экспериментальные исследования влияния электрического поля на параметры сгорания керосиновоздушной смеси / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 73–76.  
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. Vol. 58, No. 4. P.438-442.

3. Колодяжный Д.Ю. Сообщение электрического заряда каплям углеводородных топлив в резко неоднородном электрическом поле в форсуночных модулях / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 100–105.  
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, No. 3. P. 402–407.
4. 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 высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 91-97.  
Kolodyazhny D.Yu. A technique for numerical modeling of liquid film disintegration in the pneumatic injector of aircraft engines / D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorniy, A.M. Sipatov, V.Ya. Modorskii // Russian Aeronautics. 2017. No. 1. P. 97–102.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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 высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 101– 105.

- Kolodyazhny D.Yu. Computation of design parameters influence on air injector fuel atomization /A.M. Sipatov, V.Ya. Modorskii, A.V. Babushkina, D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorny // Russian Aeronautics. 2017. No. 3. P. 428–433.
11. 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.
  12. 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.
  13. 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.
  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 // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 51. Issue 1. P. 1219-1228.
  15. Kolodyazhny D.Yu. Modeling technique for the process of liquid film disintegration / V.Ya. Modorskii, A.M. Sipatov, A.V. Babushkina, D.Yu. Kolodyazhny and V.S. Nagorny // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1770. No. 030109.

#### **Публикации, приравненные к публикациям в рецензируемых научных изданиях**

16. Пат. 2582376 Российская Федерация, МПК F02М, F02В. Способ повышения эффективности распыла топлива [Текст] /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (RU). – № 2014149364; заявл. 05.12.2014; опубл. 27.04.2016. Бюл. № 12. – 11 с.: ил.
17. Пат. 2562505 Российская Федерация, МПК F02М, F02В. Способ повышения эффективности распыла топлива [Текст] / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Марчуков Е.Ю., Фёдоров С.А., Пщелко Н.С.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (RU). – № 2013156223; заявл. 17.12.2013; опубл. 10.09.2015. Бюл. № 25. – 11 с.: ил.
18. Пат. 2571990 Российская Федерация, МПК В64D. Способ повышения эффективности сгорания топлива в двигателе самолёта [Текст] /Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

(RU). – № 2014139313; заявл. 29.09.2014; опубл. 27.12.2015. Бюл. № 36. – 8 с.: ил.

19. Пат. 2545562 Российская Федерация, МПК G09D, H01Q. Способ формирования радиопоглощающих топологий на носителях [Текст] / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Марчуков Е.Ю., Мухин А.Н.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (RU). – № 2013135381; заявл. 26.07.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10. – 17 с.: 5 ил.
20. Пат. 2615618 Российская Федерация, МПК F02M. Топливная форсунка газотурбинного двигателя [Текст] / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Сипатов А.М., Хрящиков М.С., Семаков Г.Н.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (RU). – № 2015154585; заявл. 18.12.2015; опубл. 05.04.2017. Бюл. № 10. – 16 с.: 2 ил.
21. Пат. 2634649 Российская Федерация, МПК F23D. Топливная форсунка [Текст] / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю., Сипатов А.М., Хрящиков М.С., Семаков Г.Н.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (RU). – № 2016144987; заявл. 16.11.2016; опубл. 02.11.2017. Бюл. № 31. – 18 с.: 3 ил.
22. Пат. 2636947 Российская Федерация, МПК F02M. Топливная форсунка авиационного двигателя [Текст] / Нагорный В.С., Колодяжный Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (RU). – № 2016147548; заявл. 05.12.2016; опубл. 29.11.2017. Бюл. № 34. – 19 с.: 2 ил.

### **Публикации в других изданиях**

23. Kolodyazhny D.Yu. Influence of an electric field on dispersion of fuel by an atomizer of an aircraft engine / D.Yu. Kolodyazhny, V.S. Nagorniy. // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 1. Plasma, clusters, and atmosphere /. – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – P. 223-231.
24. Kolodyazhny D.Yu. 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.Yu. Kolodyazhny. // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2. Combustion and Detonation/. – Moscow: TORUS PRESS, 2016. – P. 181-185.
25. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование электрогидродинамических процессов воздействия резко неоднородных электрических полей на топливо [Текст] / В.С. Нагорный, И.Б. Войнов, Д.Ю. Колодяжный // Современное машиностроение. Наука и образование (ММЕСЕ-2016): материалы 5-й Международной научно-практической конференции (СПб, 30 июня – 01 июля 2016). – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – С. 1357-1366 (1445 с).

26. Колодяжный Д.Ю. Влияние электрического напряжения на вязкость топлива [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный // Системный анализ в проектировании и управлении: научные труды XX Международной научно-практической конференции (СПб.: 29 – 30 июня.2016). – СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2016. – Ч. 1 – С. 369-379 (440 с).
27. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование электрогидродинамических процессов в электрических устройствах воздействия на топливо [Текст] / В.С. Нагорный, И.Б. Войнов, Д.Ю. Колодяжный. // Системный анализ в проектировании и управлении: научные труды XX Международной научно-практической конференции (СПб, 29–30 июня 2016). – СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2016. – Ч. 1 – С. 361-368 (440 с).
28. Колодяжный Д.Ю. Исследование процесса переноса зарядов при течении закрученного потока диэлектрической жидкости в резко неоднородном поле [Текст] / В.С. Нагорный, А.А. Смирновский, А.С. Чернышев, Д.Ю. Колодяжный // Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики: сб. докладов XI Международной научной конференции (Петергоф, 29 июня – 03 июля 2015). Петергоф: Изд-во университета. 2015. – С. 94-97 (376 с).
29. Колодяжный Д.Ю. Параметры наночастиц серебра в рабочих жидкостях электрокаплеструйных технологий [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Вакуумная наука и техника: материалы XX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов (Сочи, 22 – 27 сентября 2013). – М.: Изд-во МИЭМ, 2013. – С. 149-154 (362 с).
30. Колодяжный Д.Ю. Методика экспериментальных исследований процессов распыла топлива на стенде СГАУ [Текст] / А.А. Диденко, Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный. // Системный анализ в проектировании и управлении: научные труды XVIII Международной научно-практической конференции (СПб, 01-03 июля 2014). – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – Ч. 2, С. 121-123 (216 с).
31. Колодяжный Д.Ю. Экспериментальное влияние электрического на химический состав продуктов сгорания топливно-воздушных смесей [Текст] / Д.Ю. Колодяжный, В.С. Нагорный //Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сб. трудов II Международной научно-практической конференции (СПб, 16-17 апреля 2014). – СПб.: Изд-во Горного университета 2014. – С. 159-161 (208 с).
32. Колодяжный Д.Ю. Повышение эффективности сгорания углеводородных топлив [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Крым Hi-Tech – 2014: материалы Международного форума (Севастополь, 25-27 сентября 2014) – М.: 2014. Изд-во РИНКЦЭ – С. 246-248. (529 с).

33. Колодяжный Д.Ю. Естественнаучные основы повышения эффективности горения углеводородных топлив при их электризации [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Системный анализ в проектировании и управлении: научные труды XVII Международной научно-практической конференции. (СПб, 01 – 03 июля 2013). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – Ч. 2. –С.136-138. (230 с).
34. Колодяжный Д.Ю. Физика получения и управления от микро-ЭВМ потоками монодисперсных капель [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: материалы XVI Международной научной конференции, (г. Николаев, Украина, 19-22 августа 2013). Николаев: Изд-во ИИТ, 2013. – С. 87-90. (253 с).
35. Колодяжный Д.Ю. Численное моделирование в вычислительной среде OPENFOAM распада струи жидкости в воздушном потоке применительно к распылу топлива в авиационных двигателях [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный, А.А. Саженов. // Системный анализ в проектировании и управлении: научные труды XXI Международной научно-практической конференции (СПб, 29– 30 июня 2017). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. – Ч.1. – С. 321-331 (360 с).
36. Колодяжный Д.Ю. Суперкомпьютерное моделирование с верификацией экспериментом электрогидродинамических процессов распыла керосина и горения керосино-воздушной смеси в авиационных двигателях [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный. // Автоматизация и приборостроение: проблемы, решения: научные труды II Международной научно-технической конференции (Севастополь, 11-15 сентября 2017). – Севастополь: Изд-во Севастопольского университета. 2017. – С. 19-22 (192 с).
37. Колодяжный Д.Ю. Определение погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых сплавов в авиадвигателестроении [Текст] / И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный, Е.О. Ларионов. // Современное машиностроение: наука и образование (ММЕСЕ-2016). Материалы 5-й Международной научно-практической конференции (СПб, 30 июня – 01.07.2016). – СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2016. – С. 936-946 (1445 с).
38. 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 [Текст] / В.С. Нагорный, Д.Ю. Колодяжный, А.М. Сипатов. // Системный анализ в проектировании и управлении (SAES-2018): научные труды XXII Международной научно-практической конференции (СПб, 22– 24 мая 2018). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2018. – Ч.2. – С. 231-237 (396 с).