

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Колодяжного Дмитрия Юрьевича «Методология исследований и разработок электрокаплеструйных способов и технологий в авиационных двигателях», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью обеспечения качественного распыла топлива с целью снижения эмиссии вредных веществ, надежного розжига камеры сгорания в высотных условиях, при одновременном снижении массы двигателя и повышении его энергоэффективности.

Научная новизна работы заключается в том, что разработаны методы, повысившие эффективность электризации углеводородных топлив и топливно-воздушной смеси, на основе численного моделирования электрогидродинамических процессов образования заряда, процессов течения двухфазных потоков, распространения капель, горения и образования вредных веществ в камере сгорания авиационного газотурбинного двигателя. Численная модель получила экспериментальное подтверждение. Разработаны и теоретически исследованы принципиально новые электрокаплеструйные методы распыла топлива, и представлено влияние конструктивных параметров электродной системы и степени закрутки керосина на количество выносимого заряда.

Представление результатов диссертационной работы на международных и всероссийских научно-технических конференциях, симпозиумах, форумах и их публикация в рецензируемых научных журналах позволяют говорить о проведении необходимой научной экспертизы полученных результатов.

Из автореферата осталось не понятным, сохраняется ли эффективность распыла в процессе длительной эксплуатации двигателя, так как тонкостенные электроды, установленные внутри форсунки, подвергаются воздействию топливно-воздушной смеси при высоких температурах.

В целом диссертация, судя по автореферату, оставляет впечатление достаточно полной и законченной работы на актуальную тему. Ее актуальность подтверждена соответствующими публикациями, апробациями на международных конференциях и опробована на реальных примерах. Диссертация соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, которым должны отвечать диссертации на соискании ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Колодяжный Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Профессор,  
Доктор технических наук



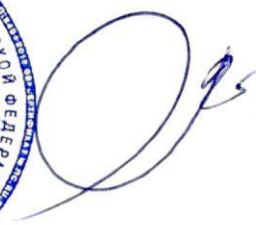
5.03.2020

Нихамкин  
Михаил Шмерович

Адрес: 614990, Российская Федерация, Пермский край, г. Пермь,  
Комсомольский проспект, д. 29.  
Рабочий телефон: 8 (342) 239-12-24  
Адрес электронной почты: [nikhamkin@mail.ru](mailto:nikhamkin@mail.ru)

Подпись Нихамкина Михаила Шмеровича заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета  
ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет»  
кандидат исторических наук, доцент



Макаревич  
Владимир Иванович

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Колодяжного Дмитрия Юрьевича  
**«Методология исследований и разработок электрокаплеструйных способов и технологий в авиационных двигателях»**,  
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

Диссертационная работа посвящена решению комплекса взаимосвязанных научных и практических задач, актуальных для развития авиационного двигателестроения, а именно — «...разработке теории и методов конструирования на базе суперкомпьютерных вычислений и верификации моделей и результатов расчетов экспериментом новых по техническому исполнению и эффективным узлам распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей – ЭКСФМ) авиационных газотурбинных двигателей, выбору их рациональных параметров, с использованием соответствующим образом организованных к действующему внутри них на протекающее топливо электрических полей».

В диссертации предложены и исследуются два варианта исполнения ЭКСФМ. В первом из них – форсуночный модуль состоит из двух самостоятельных блоков — блок 1 – это установленное в топливную магистраль, непосредственно перед форсункой, электрическое устройство воздействия на топливо (ЭУВТ), блок 2 - это обычная (штатная) топливная форсунка (ТФ), т.е. ЭКСФМ это ЭУВТ + ТФ. Во втором случае — ЭУВТ отдельным блоком отсутствует, но специальные его электроды с изоляторами вмонтированы непосредственно в саму штатную ТФ, для чего она переконструируется и получает название ЭПФ (электрическая пневмофорсунка) или ЭОФ (электрическая опытная форсунка); блок 3 – это электрический источник питания (БП), он имеется в каждом варианте сборок.

Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка использованных источников (331 наименование), содержит 191 рисунков, 56 таблиц, общий объем - 562 страницы. Каждая глава начинается аннотацией и заканчивается выводами из 12-19 пунктов, в общем заключении 17 пунктов. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК к диссертационным работам.

### 1. Актуальность темы

На основе рассмотрения тенденций развития ГТД гражданской авиации и ужесточения требований к их характеристикам – экономическим, экологическим, ресурсным, массовым и функциональной надежности, автор правильно отмечает актуальность дальнейшего совершенствования конструкции и характеристик топливных форсунок (форсуночных устройств, модулей), отвечающих в камерах сгорания двигателей за распыл топлива и образование топливно-воздушной смеси, а через них влияющих на характеристики камер сгорания, соседних с ней узлов и в итоге – всего двигателя.

Однако, требование к снижению удельного расхода топлива  $C_{уд}$  двигателя и обеспечение экономичности и безопасности авиаперевозок порождают тенденцию не только увеличения  $T_{г}^*$  – температуры газа перед турбиной, как отмечается в диссертации, но и увеличение суммарной степени повышения давления в двигателе  $\pi_{к\sum}^*$  и степени двухконтурности двигателя по воздуху  $m$ . Высокие значения, в первую очередь, именно этих параметров, оптимально согласованных друг с другом, а также КПД узлов, обеспечивают

минимум  $C_{уд}$ , но это должно быть без ухудшения показателей самолёта. Эти параметры определяют давление  $p_K^*$ , температуру  $T_K^*$  и расход воздуха  $G_{в.к}$  на входе в камеру сгорания.

С другой стороны, в высоко функциональных, эффективных и малоэмиссионных камерах сгорания лучшие показатели получаются у камер с «обедненной» или «бедной» зоной горения при значительном усложнении конструкции самих форсуночных устройств.

Изучение патентов показывает, что форсуночные устройства таких камер сгорания имеют 2-3 контура топливоподачи с соответствующим числом топливных распылителей (3-16 штук), окруженных 3-5 воздушными завихрителями, объединенных в один многоканальный блок. Форсунки регулируются изменением давления подачи топлива, отключением контуров топливоподачи, блоков распылителей или форсунок.

Внедрение в конструкцию таких сложных форсунок деталей ЭУВТ (ЭКСФМ) будет приводить к дополнительному их усложнению и снижению надежности двигателей. Это надо учитывать. Возможно, что установкой на ГТД наземного или морского применения проверить их эффективность окажется быстрее.

С другой стороны, в мире появляется еще одна тенденция — авиационный двигатель должен становиться все более электрическим. В этой связи тема и результаты настоящей диссертации могут оказаться вдвойне актуальными и востребованными.

Поэтому, выполняемые автором исследования являются актуальными, накопление НТЗ и отладку практического применения ЭКСФМ нужно продолжить.

## **2. Анализ научных и практических результатов работы**

В главе 1 представлен анализ патентной информации и литературных источников по устройствам с воздействием электрическими и магнитными полями на топливо, топливовоздушную смесь или пламя, в том числе:

- анализ электрокаплеструйных устройств (ЭКСФМ) с созданием однородных или резко неоднородных электрических и электромагнитных полей;
- проанализированы известные и получены уточнённые выражения для объемной плотности электрических зарядов  $\rho_e$  в облучаемой струе керосина, в том числе, разрушающейся на капли, а также влияние полей на физические характеристики жидкостей (поверхностное натяжение), распыла топлива, скорость испарения и воспламенение заряженных капель;
- влияние электромагнитных полей на химико-кинетические предпламенные и пламенные процессы, включая деструкцию больших молекул углеводородного горючего.

Материалы диссертации и первоисточники показывают, что воздействие электрических и магнитных полей сказывается, как правило, положительно на улучшение физико-химических свойств жидкостей и процессов распыла, смесеобразования и горения, но проявляется в разной степени, «... до конца не выяснено и это затрудняет практическое использование...».

В главе 1 представлены типичные по конструкции топливно-воздушные форсунки ГТД, в том числе используемые в данной работе как объекты исследования. Автор проанализировал матмодели процессов, уравнения течений и особенности компьютерных технологий численного моделирования, включая создание КЭ-сеток, моделей турбулентности, горения, интегрирования уравнений и возможностей коммерческих пакетов программ гидрогазодинамического моделирования (CFD).

Автор справедливо отмечает, что качество распыливания топлива понимается и оценивается комплексно — величинами диаметров капель распыливаемого топлива, однородностью распределения топлива в ТВС, по зоне горения и показателями улучшения

интегральных характеристик горения ТВС — температурой и неравномерностью температуры газа на выходе из КС, эмиссией вредных веществ – NO<sub>x</sub>, CO, HC, сажи и другими.

Глава 1 завершается постановкой задач и изложением общей стратегии исследования.

В Главе 2 рассмотрены основы и механизм влияния электрических полей на физические свойства топлива и сообщение электрического заряда потокам и каплям топлива, приведены уточненные выражения для вязкости и поверхностного натяжения жидкости (керосина), которые затем используются при численном моделировании ЭГД-процессов.

Автор обращает наше внимание, что предельной величины своего электрического заряда капли в ЭКСФМ приобретают за время 0,1...0,12 с (т.е. за 100-120 мс), что нужно учитывать при их проектировании и в расчетах процессов. Однако заметим, что в реальных форсуночных устройствах, типа ЭПФ, топливо находится значительно меньшее время – на 1-2 порядка, поэтому к выходу из него капли приобретут вероятно не 90%, а, возможно, ~20% и менее от предельной его величины.

Из двух известных (по литературе) моделей автор применяет «инжекционную», согласно которой, топливо, протекая вдоль поверхности электрода-эмиттера, смывает, т.е. принимает на себя электрические заряды.

В диссертации разработана 3D модель простейшего ЭУВТ с центральным электродом-эмиттером в форме иглы и апробирована для нее система ЭГД-уравнений, описывающих перенос заряда в некотором поле скорости несущей жидкости внутри этого ЭУВТ. Отметим, что для этого варианта результаты расчетов и экспериментов согласуются очень хорошо.

Коэффициенты инжекционной модели проверены выполнением расчетов для специальной электропневматической форсунки (ЭПФ на базе форсунки двигателя ПД-14) и для сборки ЭУВТ + штатная ТФ. В ходе этой проверки получена настроечная вольт-амперная характеристика ЭПФ, проанализировано влияние радиусов скругления острой кромки электрода-эмиттера и параметров конечно-элементной (КЭ) сетки расчётной модели.

По результатам исследований и разработок автором получено 6 (шесть) патентов Российской Федерации – это является убедительным подтверждением новизны и практической значимости диссертационной работы.

В Главе 3 представлены разработанные методы построения электрокаплеструйных форсуночных модулей (ЭКСФМ) в применении к авиационным двигателям. Предложена и продемонстрирована работоспособность общей стратегии и методологии исследований ЭКСФМ. Автор объединяет их одним словом – технология Динамического конструирования, которая подразумевает некоторое динамическое единство и применение с взаимным корректированием получаемых результатов на этапах: 1) конструирование, 2) численное моделирование, 3) изготовление опытных образцов, 4) экспериментальная проверка.

В этой связи заметим, имеются схожие технологии, например, традиционно эти задачи решаются на этапах расчётно-экспериментальной доводки изделий. Не так давно модным и оправданным было применение технологии «комплексного подхода», «системного анализа», «сквозного процесса разработки» в выполнении НИР/НИОКТР. В настоящее время научно-техническая конкуренция в исследованиях вынуждает добавить к ним определение «уровней технологической готовности» разработок и технологий.

Автору диссертации, на основе изучения по патентам устройств с электрическим воздействием на топливо, монографий и диссертационных работ по деструкции больших топливных молекул к более простым углеводородам, с одновременным появлением активных центров и распространением волн активации, удалось выработать качественную картину для

понимания механизма физических процессов при воздействии на топливные молекулы слабыми переменными электрическими полями и определиться с оптимальной частотой электрического напряжения, определяемой максимальной величиной диэлектрических потерь в облучаемом топливе. В итоге, беря за основу конструкции ЭУВТ - активаторов топлива для поршневых двигателей (дизель, ВАЗ-2111), автору удалось сконструировать автономное ЭУВТ для установки его перед форсунками авиационных ГТД.

Выработанное понимание физических процессов, протекающих в межэлектродном зазоре при воздействии на топливо электрическим полем, позволило автору разработать оригинальную конструкцию электропневматической форсунки (ЭПФ) на основе штатной ТФ камеры сгорания двигателя ПД-14. Для изоляторов электродов в форсунке выбрана корундоциркониевая керамика ( $Al_2O_3$ –95%,  $ZrO_2$  – 5%), отработана технология изготовления из нее необходимых деталей, с контролем качества образцов. Теоретически обосновано ожидаемое улучшение мелкости распыливания топлива за счет изменения его свойств при облучении его электрическим полем при требуемой конструкции электродов в ЭПФ.

В Главе 4 представлены результаты исследований разработанных математических и численных ЭГД-моделей процессов получения (инъекции) и переноса, т.н. униполярного электрического заряда закрученным потоком керосина в электрокаплеструйных форсуночных модулях (ЭКСФМ) применительно к условиям в камерах сгорания авиационных двигателей, в частности выполнены:

- обзор литературы в области численного моделирования ЭГД-процессов и анализ возможностей пакетов численного моделирования, используемых уравнений, в т.ч. переноса заряда и описания турбулентности;

- расчетные исследования процесса инъекции и переноса зарядов в модельном упрощенном варианте форсуночного модуля со встроенными в него двумя электродами;

- численное моделирование выполнялось с использованием открытого программного пакета, в частности OpenFOAM, существующие решатели которого были доработаны под конкретные условия исследования ЭГД-процессов;

- в ходе численного моделирования поставленных задач одновременно была отработана и применялась двухэтапная вычислительная процедура: сначала расчет в RANS-постановке без электрических полей для получения данных о структуре потока керосина, затем на основе этого были сформулированы граничные условия и выполнен второй этап расчетов – с электрическими полями;

- для изучения чувствительности результатов численного моделирования к возможным конструктивным изменениям ЭКСФМ было исследовано влияние изменения величины межэлектродного зазора на структуру поля скорости в форсуночном модуле;

- по тексту диссертации и в выводах по главе 4 авторы отмечают эффективность разрабатываемого устройства и что количество выносимого из форсунки электрического заряда достигает 80% от инжектируемого с игольчатого электрода. По нашему мнению, представленные в диссертации графики показывают, что эта величина  $\approx 20\%$ .

В Главе 5 представлены результаты численного и экспериментального исследования ЭГД-процессов и распыла топлива в практических устройствах, а именно:

- 3D геометрическая и расчетная модель ЭУВТ «щеточного» типа с большим числом игольчатых электродов-эмиттеров и результаты CFD-расчета распределения электрического заряда внутри (базового по конструкции) ЭУВТ;

- 3D CFD-расчеты течения керосина с воздействием электрических полей в ЭПФ (испытывалась в АО «ОДК-Авиадвигатель»);

– теоретическая модель, фундаментального характера, системы уравнений и результаты CFD-расчета одиночной тонкой струи жидкости в сносящем потоке с расчетом распределения массы жидкости в нескольких поперечных сечениях;

– результаты 3D CFD-расчетов, с учетом влияния электрических полей на физические свойства топлива ( $\sigma_{ж}$ ), полей скорости и распределения распыленной массы топлива (но не диаметров  $d_k$  и числа капель  $N_k$ ) в единицу времени для двух вариантов сборок ЭУВТ + (ТФ-1) и ЭПФ;

– результаты экспериментальных исследований, выполненных в Самарском университете (прежний СГАУ) на форсуночном атмосферном стенде с применением 3D-LDA-PDA лазерно-оптических измерителей, характеристик факела распыла вариантов сборки ЭУВТ<sub>i</sub> + (ТФ-1) и ЭУВТ<sub>i</sub> + (ТФ-2) для 6-ти вариантов ЭУВТ и 5-ти вариантов электрических БП<sub>j</sub> с целью последующей верификации результатов и расчетных моделей CFD моделирования – измерен комплекс следующих их характеристик: расходы топлива и воздуха, углы факела распыла, скорости воздуха, скорости и диаметры капель, а также количество капель в единицу времени в поле большого числа точек факела распыла; результаты представлены многочисленными графиками изменения параметров.

В Главе 6 диссертации представлены матмодели и результаты численного исследования горения ТВС в камерах сгорания с воздействием электрическими полями, а также результаты соответствующих экспериментальных исследований, выполненных на испытательных огневых стендах камер сгорания в Самарском университете и в АО «ОДК-Авиадвигатель», а именно:

– в Самарском университете объектами экспериментального исследования были однофорсуночная камера сгорания (1ф-КС) с индивидуальной жаровой трубой и установленной в нее центробежной топливной форсункой с подключенными в магистраль подачи топлива вариантами сборок ЭУВТ<sub>i</sub> + БП<sub>j</sub>;

– на экспериментальном атмосферном стенде Самарского университета выполнены испытания однофорсуночной КС (температура воздуха на входе - 150 °С) с применением 3D-LDA лазерно-оптических измерителей, пробоотборных методов и хроматографического анализа, с 6 вариантами сборок ЭУВТ<sub>i</sub> + (ТФ-2) и 5 вариантами электрических БП<sub>j</sub> с целью последующей верификации результатов и расчетных моделей CFD моделирования. Так, измерен комплекс следующих характеристик по выходу из КС: расходы топлива и воздуха - интегрально; скорости газа, статическое и полное давление и температура газа - в 115 точках, состав продуктов сгорания – в 16 репрезентативных точках отбора проб; всего выполнено около 185 испытаний в сумме на двух стендах Самарского университета; по комплексу характеристик определен базовый вариант ЭУВТ + БП;

– численное 3D-моделирование в ANSYS CFX с применением суперкомпьютерных технологий процесса горения в 1ф-КС с ЭУВТ без и с воздействием электрическим полем выполнены в СПбПУ. Моделирование осуществлялось с учетом присутствия второй фазы — капель распыленного топлива и с использованием моделирования химии горения по средней скорости реакции горения, определяемой в приближении диффузионного горения, которое лимитируется скоростью турбулентного смешения, и с определением концентрации пассивного скаляра  $z_\alpha$  или, иначе, переменной смешения. Так как требуется определить точно лишь температуру газа, то ограничились присутствием в составе газа трех компонентов – воздух (окислитель), топливо (горючее) и продукты сгорания. В

используемой матмодели зона химической реакции принималась тонкой, турбулентный перенос химических компонентов определялся скалярной диссипацией

– численное моделирование, выполненное в СПбПУ с базовым ЭУВТ, показало, что воздействие электрическим полем приводит к увеличению температуры газа в поперечном сечении на выходе из КС: среднемассовой – на  $10-30^\circ$  ( $\leq 5,5\%$ ) и максимальной локальной – до  $60^\circ$  ( $+10,6\%$ ); в экспериментах Самарского университета получено, соответственно,  $+4,1\%$  и  $+4,9\%$ ;

– выполнено 3D численное моделирование рабочего процесса с определением температуры деталей ЭПФ для условий двигателя ПД-14 с целью проверки её работоспособности;

– на экспериментальном стенде в АО «ОДК-Авиадвигатель» выполнено испытание пятифорсуночного (5ф-ОКС) отсека КС двигателя ПД-14 с включением базового ЭУВТ в магистраль подачи топлива к трем форсункам внешнего контура без воздействия и с воздействием электрическим полем на топливо; параметры соответствовали режиму малого газа двигателя (тяга  $7\%$  от взлетной): давление  $p_K \leq 5,3$  ат и температура воздуха  $t_K = 219^\circ\text{C}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha_K = 4,51$ . Основные результаты по выбросам вредных веществ – индексы эмиссии: EI ( $\text{NO}_x$ ) – практически не изменились, EI ( $\text{CO}$ ) – снизились на  $9,5-11,8\%$ , EI ( $\text{HC}$ ) – снизились на  $4-57,9\%$ , полнота сгорания топлива  $\eta_T$  – повысилась на  $0,1-1,02\%$ .

### 3. Научная новизна работы

– Впервые, применительно к камерам сгорания авиационных ГТД, разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и смесеобразования с использованием ЭУВТ или ЭКСФМ, выполняющих активацию топлива к горению за счет воздействия на струю топлива или образующиеся капли электрическими полями с изменяющейся частотой;

– проанализированы известные и получены уточненные выражения для объемной плотности электрических зарядов  $\rho_e$  в струе керосина, вязкости  $\mu_{\text{ж}}$  и коэффициента поверхностного натяжения керосина  $\sigma_{\text{ж}}$  под воздействием электрических полей в ЭУВТ, а также значения этих свойств для конкретных условий облучения;

– с применением известных CFD пакетов ANSYS Fluent/CFX и OpenFOAM и отработанных суперкомпьютерных технологий разработаны численные матмодели (с учетом уточненных физических свойств керосина, испытывающего воздействие электрическими полями) процессов в форсуночных устройствах и в камерах сгорания, без горения и с горением топлива:

- в неоднородном электрическом поле образования электрических зарядов в струе керосина и на каплях в ЭКСФМ авиадвигателей;
- течения двухфазных потоков с переносом электрического заряда и с образованием факелов распыла, распространения и испарения заряженных капель, горения и образования продуктов сгорания в КС ГТД;
- совокупность полученных результатов численного моделирования и экспериментальных исследований с различными вариантами характеристик облучающих электрических полей составляет научные основы для расчета и современного проектирования и изготовления ЭКСФМ, показывающие в целом положительное влияние электрических полей на характеристики факелов распыла и камер сгорания на режимах пониженной газодинамической напряженности и тяги двигателя.



#### 4. Практическая значимость

- разработаны и изготовлены устройства с вариантами исполнения и воздействия электрическими полями разной мощности и частоты ЭУВТ и ЭКСФМ на поток жидкого топлива (диэлектрика) применительно к использованию на авиационных ГТД. На разработанные устройства получено 6 (шесть) патентов Российской Федерации;

- разработана конструкция, технология изготовления и изготовлен экспериментальный образец форсунки (ЭПФ) на основе модернизации штатного варианта форсунки перспективного двигателя 5-го поколения ПД-14;

- в испытаниях форсуночных устройств на стенде Самарского университета получены положительные результаты о комплексе характеристик факелов распыла авиационных ТФ для нескольких вариантов ЭУВТ<sub>i</sub> + БП<sub>j</sub>, позволившие уточнить их конструкцию и определить базовый по комплексу характеристик ЭУВТ+БП;

- в испытаниях на стенде АО «ОДК-Авиадвигатель» в составе пятифорсуночного отсека КС ПД-14 разработанные и изготовленные базовая сборка ЭУВТ + БП и ЭПФ продемонстрировали хорошую работоспособность при повышенных давлениях и температурах воздуха на входе в КС.

#### 5. Замечания и недостатки в работе. Из недостатков можно отметить следующее:

- в автореферате (с. 4) и во Введении в диссертации тенденции развития параметров авиационных двигателей иллюстрируются только в росте температуры газа в среднем «всего лишь на 315 К и борьба идет за каждый градус», но это значительное увеличение  $T_{г^*}$ . Возникает вопрос: почему ничего не сказано о  $\pi_{к\Sigma}^*$ ,  $m$ , КПД узлов, определяющих параметры на входе в камеру сгорания, материалах и т.п.?

- на с. 169 диссертации говорится, что в расчетной задаче используется трансформаторное масло. Возникает вопрос, насколько оправдано рассматривать случай с рабочей жидкостью, далёкой по свойствам от авиационного керосина?

- на с. 288 в диссертации, ссылка на [275]: говорится о поведении поверхности капли диаметром 5 мм, находящейся между электродами, погруженной в ньютоновскую жидкость. Вопрос: является ли рассмотрение этого примера актуальным для камер сгорания авиационных двигателей?

- с. 301 в диссертации (последний абзац) «... концентрация ионов настолько мала, что влиянием ионов на физические свойства жидкости можно пренебречь». Возникает вопросы, насколько это обосновано для применяемых в работе ЭУВТ? и для задачи точного учёта изменения физических свойств рабочей жидкости?

- рисунок 4.23 диссертации (говорится о плотности токов ионов  $\bar{I}$  на выходе из форсуночного модуля): из рисунка видно, что  $\bar{I}_{\text{вых}} \approx 0,2$  для выходящих из ФМ ионов и  $\bar{I}_{\text{нейтр}} \approx 0,8$  для ионов, нейтрализуемых на 2-ом электроде. А по тексту в диссертации говорится, что  $\bar{I}_{\text{вых}} \approx 0,8$ . Т.е. текст противоречит данным на рисунке или это опечатка?

- на с.404-405 диссертации анализируется график на рис.5.36 изменения числа регистрируемых в единицу времени капель  $\dot{N}_k$ , шт/с. Говорится, что количество капель на радиусе 20-40 мм на два порядка больше, чем на оси и на три порядка больше, чем на периферии ( $R > 45$  мм) факела, и далее делается заключение: «... попадание капель в центр и на периферию сечения носит скорее случайный характер и не разрешается при численном

моделировании...». Возникает вопросы: почему случайный? и почему нет ссылки на источник

– в диссертации сравнение распределения диаметров капель по радиусу, полученных в экспериментах и в расчетах, дается в единственном месте - фрагментом на рис. 5.37. Замечание – опять график без ссылки на первоисточник. Возникает вопрос – можно ли представить сравнение с более полным использованием имеющихся у автора результатов численного моделирования и экспериментов?

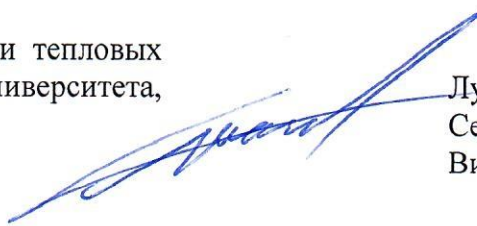
## 6. Заключение

Диссертационная работа Дмитрия Юрьевича Колодяжного есть хорошая демонстрация комплексного подхода и достижения решения разнородных и сложных задач – от проектирования и расчётного исследования, через трудные задачи изготовления из металла и керамики и до экспериментального исследования опытных образцов ЭКСФМ на испытательных стендах форсуночных устройств и отсеков камер сгорания авиационных ГТД, причем с применением передовых систем измерения, в том числе лазерно-оптических в Самарском университете и передовой стендовой базы и новейшей камеры сгорания в АО «ОДК-Авиадвигатель», а также технологий численного моделирования ЭГД-процессов с использованием суперкомпьютерных технологий.

Полученные результаты являются в основном новыми, диссертация представляет собой завершённое научное исследование. Предлагаемая методология и технология исследований защищены полученными научными и практическими результатами.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Д.Ю. Колодяжный заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей (ТиТД) Самарского университета, доктор технических наук, профессор  
8 (846) 335-18-12; (846) 267-45-66



Лукачев  
Сергей  
Викторович

Кандидат технических наук, с.н.с., научный руководитель лаборатории лазерной диагностики структуры потока НОЦ ГДИ, доцент кафедры ТиТД Самарского университета  
8 (846) 267-47-70; 8-908-414-93-34;  
E-mail: [aanm\\_didenko@rambler.ru](mailto:aanm_didenko@rambler.ru)



05.03.2020

Диденко  
Алексей  
Александрович

443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34, корп. 11, к.207

Подписи С.В. Лукачева и А.А. Диденко подтверждают:

Ученый секретарь Самарского университета,  
д.т.н., профессор



В.С. Кузьмичев