

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Колодяжного Дмитрия Юрьевича «Методология исследований и разработок электрокаплеструйных способов и технологий в авиационных двигателях»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов формирования топливо-воздушной смеси с целью разработки методов и способов позволяющих на основе полученных результатов, улучшить экологические и энергетические характеристики получающихся продуктов сжигания топлива применительно к камерам сгорания авиационных двигателей. Предполагается, что, одним из путей решения обозначенной выше актуальной проблемы является улучшение качества распыла топлива и сгорания ТВС в авиадвигателях можно достигнуть путем использования новых физических явлений, в частности электрокаплеструйных технологий.

В результате исследования электрокаплеструйных методов и электрогидродинамических (ЭГД) процессов при воздействии электрических полей на топливо, сообщении электрического заряда потоку и каплям углеводородного топлива (керосина), влияния электрического поля на ЭГД процессы распыла топлива и горения ТВС разработаны электрокаплеструйные узлы распыла топлива и сгорания ТВС применительно к авиадвигателям.

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 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, определены объект и предмет исследований, цель работы и решаемые научно-технические задачи. Повышение энергоэффективности авиационных двигателей за счет роста режимных параметров и ужесточение норм по уровню вредных выбросов от авиационных двигателей требует обеспечения более качественного распыла топлива, обеспечивающего как снижения эмиссии вредных веществ, так и надежного розжига камеры сгорания в высотных условиях, когда распыл существенно ухудшается. Проблема усложняется ещё и тем, что требования по дальнейшему снижению массы двигателя, увеличению общего ресурса его работы приводят к необходимости снижать перепад давления топлива на форсунках, уменьшать габариты камеры сгорания. В результате, требуемое качество распыла можно обеспечить при помощи разработки специальных распыливающих устройств.

В диссертационной работе предлагается для улучшения качества распыла топлива и сгорания топливно-воздушной смеси, использовать электрокаплеструйные технологии с соответствующим образом организованными электрическими полями в цепях подачи топлива к форсунке и (или) непосредственно в самой форсунке при распыливании топлива на капли. Поэтому разработка научно обоснованных технических и технологических решений при реализации разработанных новых электрокаплеструйных форсуночных модулей и технологий (без инерционных подвижных электромеханических элементов) узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей - ЭКСФМ) авиационных двигателей, выбор их рациональных конструктивных параметров, обладающих повышенными качественными показателями распыла топлива по сравнению с существующими конструкциями и обеспечивающих улучшение процессов каплеобразования топлива, смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси в авиационных двигателях **безусловно определяет актуальность** тематики работы.

В первой главе на основе проведенного изучения методов, используемых для повышения эффективности процессов горения углеводородных топлив показано, что наиболее широко применяются электромагнитные поля воздействия на топливо. Однако, эти воздействия на топливо организовывались применительно к двигателям внутреннего сгорания и различного типа горелкам. Применительно к газотурбинным двигателям (ГТД) использование электрических полей для повышения эффективности сгорания керосина рассмотрено в данной диссертации впервые. Исследования показали, что сообщение электрического заряда каплям топлива улучшает показатели воспламенения и горения топлив и топливно-воздушных смесей, а также диспергирования топлив. Однако эти исследования проведены при атмосферном давлении и малых перепадах давлений, когда скорости капель очень малы, что существенно отличается от условий работы авиационных двигателей. С учетом проведенного анализа сформулированы **цели и задачи исследования**: на базе форсунок ГТД с соответствующим образом организованных электрических полей с использованием электрических устройств воздействия на топливо (ЭУВТ) при исследованиях и разработке форсуночных модулей показать пути дальнейшего улучшения показателей распыла топлива и горения топливно-воздушной смеси; разработать и исследовать эффективные электрокаплеструйные методы создания (без применения инерционных и ненадежных подвижных механических и электромеханических элементов) узлов распыла топлива (ЭКСФМ) авиационных двигателей выбором (на базе разработанных численных моделей исследуемых процессов) их рациональных электрогидродинамических, гидродинамических, электрических, конструктивных параметров.

Во второй главе проведено исследование физических процессов происходящих при организации процессов сообщения униполярного заряда каплям топлива в топливовоздушной смеси на выходе из электрокаплеструйных форсуночных модулей в поле коронного разряда, и потокам и струям топлива в резко неоднородных электрических полях. Разработана (для модельной задачи) электрогидродинамическая модель, проведено численное ее исследование и уточнена инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в керосине у игольчатого электрода в резко неоднородном поле, показавшая в диапазоне изменений электрического напряжения на электродах (0–15) кВ с точностью до 2 % совпадение с экспериментальными данными. Разработана расчетная модель и методика численного расчета для определения вольт-амперных характеристик реальной впервые созданной электропневматической форсунки газотурбинного авиадвигателя. *В результате предложены электрофизические основы повышения эффективности процессов распыла топлива и горения топливовоздушной смеси в авиационных двигателях с использованием в ЭУВТ переменных электрических полей.*

Третья глава посвящена разработке электрокаплеструйных методов построения ЭКСФМ авиационных двигателей, под которыми понимается ЭУВТ плюс собственно топливная форсунка. При этом, критерием эффективности функционирования электрокаплеструйных форсуночных модулей является улучшение качества распыла топлива, под которым понимается: соответствующая величина угла топливного факела на выходе форсунки, получение минимального диаметра капель распыливаемого топлива на выходе форсунки, однородность распределения топлива в топливовоздушной смеси, интегральные показатели улучшения процессов горения топливно-воздушной смеси в камере сгорания авиационного двигателя. Качество сгорания топливовоздушной смеси оценивается, в частности, по следующим показателям: химический состав продуктов сгорания на выходе камеры сгорания, характеристики температуры газа (продуктов сгорания), характеристики «бедного» срыва пламени в камере сгорания. *Впервые в мире 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 ЭУВТ постоянных и резко неоднородных переменных электрических полей и их совместного использования. Предложены конструктивные и технологические решения для конструирования ЭКСФМ, в частности впервые разработаны (защищенные патентами РФ) две электропневматические топливные форсунки: для камер сгорания богато-бедного типа газотурбинных авиационных двигателей с переменным резко неоднородным электрическим полем с изменяющейся частотой и амплитудой при относительно малых (до*

4кВ) маломощных (до 1Вт) напряжениях на электродах, отличающиеся принципиально новыми конструктивными решениями.

В четвертой главе представлены результаты численного исследования процессов в электрокаплеструйных форсуночных модулях, работающих на керосине применительно к турбореактивным авиационным двигателям. Рассмотрены электрогидродинамические процессы инжекции в поток топлива (керосина) униполярного электрического заряда знака потенциала острого электрода, размещенного внутри топливной форсунки, и переноса заряда к выходному срезу сопла. На основе подробного анализа литературы в области численного моделирования электрогидродинамических процессов в струях и потоках диэлектрических жидкостей предложены математические модели и проведены расчеты, которые проводились для выработки рекомендаций по обеспечению максимального электрического заряда в закрученном потоке топлива на выходе электрокаплеструйной форсунки путём варьирования соответствующих гидродинамических, электрических и конструктивных параметров. В результате *разработана модель электрокаплеструйного форсуночного модуля применительно к турбореактивным авиационным двигателям, в которой электродная часть ЭУВТ является конструктивным элементом топливной форсунки авиадвигателя*, причем при снятии напряжения с электродов форсунка работает как штатная (доработанная), а при подаче напряжения на электроды работает как электрокаплеструйный форсуночный модуль. Разработана (с позиций увеличения точности расчетов) методология численных исследований рассматриваемых процессов.

Пятая глава. С целью верификации методологии численных исследований на базе конструкции базового ЭУВТ разработана модель электрического устройства воздействия на топливо в цепи гидравлического питания топливной форсунки авиационного двигателя. Для моделирования электрогидродинамического процесса была разработана расчетная численная модель образования униполярных ионов с концов игольчатых электродов инжекционной модели с соответствующими коэффициентами инжекции. *В расчёте моделировались условия испытания форсунок на стенде АО «ОДК – Авиадвигатель» по определению параметров распыла топлива.* Разработана методика расчета двухфазных потоков в форсуночных модулях на основе решения модельной задачи – верификации модели двухфазного течения на задаче распада жидкой колонны под действием набегающего потока воздуха на модельном воздуховодяном рабочем теле. В целом, распределения, полученные при численном моделировании, качественно совпадали с результатами эксперимента. Численное моделирование процесса распыла топлива продемонстрировало, что снижение коэффициента поверхностного натяжения капель при сообщении им униполярного электрического заряда приводит к снижению диаметров капель топлива по

всему конусу распыла. В результате разработана методология численного моделирования электрогидродинамических процессов распыла топлива, продемонстрированная на примере конструирования экспериментального образца пневматической форсунки с улучшенными характеристиками распыла топлива как *элемента форсуночного модуля применительно к газотурбинному авиационному двигателю типа ПД-14*.

Шестая глава подводит итоги предыдущих исследований и окончательную проверку новой электрогидродинамической технологии путем численного расчета процессов горения керосино-воздушной смеси в модельной камере сгорания газотурбинного авиадвигателя с резко неоднородными электрическими полями в цепи питания центробежной топливной форсунки и проведения реального эксперимента по сжиганию керосинового топлива при огневых испытаниях электрокаплеструйных форсуночных модулей. В качестве топливной форсунки *использована центробежная топливная форсунка ФГУП ММПП «Салют» (г. Москва)*. Эксперименты проводились на модельной камере сгорания, причем углы факела распыла, размеры капель топлива и скорости их движения принимались на основе впервые полученных экспериментальных данных по соответствующим параметрам распыла. Сравнение результатов полученных без подачи напряжения на электроды ЭУВТ с данными полученными при подаче напряжения показало, что использование электрокаплеструйных форсуночных модулей с базовым ЭУВТ повышает среднюю температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы; (когда напряжение не электродах ЭУВТ отсутствует), максимальную температуру газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы и снижает неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы. Результаты, полученные численно и экспериментально, показывают, что применение воздействия электрического поля на топливо приводит к повышению температуры горения. Таким образом, подтверждаются базовые положения теоретических моделей. *Испытания на пятигорелочном отсеке камеры сгорания авиационного двигателя ПД-14* по эмиссии газообразных веществ на режиме малого газа показали существенное уменьшение концентрации несгоревших углеводородов HC и снижение эмиссии CO на режиме 7 % взлетной тяги при подаче электрического напряжения на электроды ЭУВТ по сравнению с вариантом отсутствия электрического напряжения на электродах ЭУВТ: уменьшается концентрации несгоревших углеводородов HC - на 57,3%, а CO в исходящих продуктах горения уменьшается на 10,6%. Все это свидетельствует об улучшении параметров распыла топлива и увеличении полноты сгорания топлива;

Замечания по работе.

-отсутствие перечня обозначений и используемых автором сокращений затрудняет знакомство с работой, причем иногда одни и те же параметры обозначены разными буквами.

-наличие повторов ранее изложенной информации в последующих главах,
-в работе не рассматривается зона обратных токов, которая является принципиальным элементом, обеспечивающим стабилизацию фронта пламени в основных камерах сгорания, и которая влияет на конечные результаты сжигания топлива. Изменение угла распыла форсунок при подаче напряжения свидетельствует о деформации зоны обратных токов;

-отсутствует оценка использования предлагаемых устройств, которая важна поскольку эти устройства устанавливаются на авиационный двигатель.

Сделанные замечания не снижают качества работы, выполненной на высоком научном уровне, и не влияют на выводы и результаты работы.

Предложены научно обоснованные технические и технологические решения при реализации разработанных новых электрокаплеструйных форсуночных модулей и технологий, эффективность которых подтверждена как численными расчетами, так и результатами эксперимента на реальной камере сгорания авиационного двигателя. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные в ней результаты. Результаты работы внедрены на предприятиях ОКБ им.А.Люльки и АО-«ОДК авиадвигатель» .

В диссертационной работе сформулирована и решена актуальная научная проблема использования электрогидродинамического метода управления процессами смесеобразования и горения топливно-воздушных смесей, основанного на методах численного моделирования, конструирования и верификации экспериментом эффективных узлов распыла топлива (электрокаплеструйных форсуночных модулей) авиационных двигателей. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными, достоверными и обладают научной новизной.

Диссертация соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09. 2013 г. № 842, ред. от 01.10.2018, а её автор, Колодяжный Дмитрий Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Теория воздушно реактивных двигателей» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)



Лепешинский Игорь .Александрович

«02» марта 2020г

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)", телефон: +7(499)158-58-70, e-mail: mai@mai.ru

Подлинность подписи официального оппонента Лепешинского Игоря Александровича заверяю _____

Директор дирекции института №2 МАИ  Монахова В.П.

