

**ОТЗЫВ**  
**научного консультанта**  
**на диссертационную работу 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.**

Диссертация посвящена решению 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 взаимосвязанных электрогидродинамических (ЭГД), гидродинамических, электрических, конструктивных параметров с использованием соответствующим образом организованных электрических полей.

Цель работы - более эффективно (по сравнению с известными методами) управлять дисперсностью топлив, процессами образования, воспламенения и горения керосино-воздушных смесей (КВС) в различных типах авиадвигателей.

Автором предложена стратегия исследований и разработок ЭКСФМ, основанная на разработанной технологии Динамического конструирования с использованием суперкомпьютерных вычислений и верификации экспериментом реальных конструкций ЭКСФМ на современном оборудовании и обеспечивает патентоспособность и конкурентоспособность разработок на рынке с целым рядом «ноу-хау». Колодяжным Д.Ю. получено 7 патентов РФ на способы повышения эффективности распыла топлива (керосина) и сгорания КВС в авиадвигателях, что официально подтверждает мировую новизну и практическую значимость полученных результатов проведенных исследований.

Колодяжным Д.Ю. впервые применительно к газотурбинным авиационным двигателям - ГТД (на примере современного инновационного ГТД пятого поколения типа ПД-14) разработаны методы и технологии повышения эффективности распыла жидкого топлива (керосина) и горения КВС с использованием ЭУВТ в гидравлической цепи питания топливной форсунки и в самой форсунке с резко неоднородными электрическими полями для сообщения электрического заряда топливу.

Автором показано, что электрический заряд капель углеводородных топлив не только уменьшает эффективное поверхностное натяжение капель, но и уменьшает диаметры капель при распыливании топлива. Впервые получена безразмерная формула зависимости эффективного поверхностного натяжения капли топлива от величины заряда, хорошо отображающая результаты экспериментов. Уточнена инжекционная модель образования униполярного электрического заряда в потоке керосина в резко неоднородном электрическом поле. Полученные аналитические выражения автором использованы в разработанных численных моделях ЭГД процессов в ЭКСФМ при распыле керосина и горения КВС применительно к авиационным двигателям.

Проведено (с использованием вихреразрешающих подходов для моделирования турбулентности DES и LES) трехмерное численное моделирование закрученного турбулентного течения керосина как без, так и с учётом ЭГД взаимодействия, что позволило корректно оценить влияние электрического поля на исследуемые процессы. Колодяжным Д.Ю. показано, что на некотором удалении от топливного завихрителя течение топлива (керосина) является осесимметричным и профили скорости закрученного

---

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

потока топлива могут быть аппроксимированы гауссовым распределением; течение керосина является нестационарным; за счёт интенсивного турбулентного переноса количество выносимого из форсунки униполярного заряда достигает около 80% инжектируемого с игольчатого электрода заряда в закрученный топливным завихрителем поток керосина. Эти результаты использованы при дальнейших исследованиях.

На основании проверенных экспериментом разработанных численных моделей автором 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. В рамках разработанной автором технологии Динамического конструирования при численном трехмерном моделировании рассматриваемых нестационарных процессов, характерных для авиадвигателей, решены задачи повышения точности и достоверности численных моделей с целью получения наибольшего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными.

Колодяжный Д.Ю. принял активное творческое участие в верификации экспериментом результатов численного моделирования ЭГД процессов распыла керосина и горения КВС как на модельных, так и на реальных КС ГТД. Впервые в мировой практике изготовлены (на основании результатов численных 3D CFD расчетов) экспериментальные образцы ЭКСФМ с электродной системой ЭУВТ для организации резко неоднородных электрических полей (электропневматическая форсунка - ЭПФ), имеющих идентичные параметры по расходу топлива и воздуха, а также внешние установочные параметры как и в штатной пневматической форсунке ГТД. Им 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.

Все вышесказанное в сочетании с разработанными численными моделями рассматриваемых процессов с основными полученными (как правило, впервые) теоретическими и экспериментальными результатами представляет весьма универсальный аппарат теоретического и практического анализа разработанного нового класса форсуночных модулей – ЭКСФМ и электрокапеструйных технологий и определяет дальнейшие пути целенаправленного поиска частных электрокапеструйных методов. При этом новыми являются большинство результатов, поскольку большинство методов и ЭКСФМ применительно к авиационным двигателям исследовано и разработано впервые.

При впервые проведенных с творческим участием автора огневых испытаниях по разработанным методикам влияния конструктивных и электрических параметров ЭУВТ на распыл керосина и горение КВС на современном оборудовании как на модельных, так и на реальных КС авиадвигателей с центробежными и пневматическими форсунками экспериментально подтверждено, что использование электрических полей в ЭКСФМ позволяет улучшить характеристики распыла топлива и сгорания КВС в КС авиационного газотурбинного двигателя:

– 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  $\Delta \bar{p}_B$ , угол топливного факела  $\varphi_{ТФ}$  при наличии электрического напряжения на электродах ЭКСФМ увеличивается,

причём, чем больше перепад давления по топливу  $\Delta p_T$ , тем менее значительно это увеличение. Значение угла топливного факела  $\varphi_{TФ}$  оказывается больше (до 36,4 %);

– повышается средняя температура газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,09 % относительно базы;

– повышается максимальная температура газа на выходе газосборника камеры сгорания на 4,88 % относительно базы;

– снижается неравномерность поля температур газа на выходе газосборника камеры сгорания на 10,34 % относительно базы;

– установлено, что при впервые проведенных огневых испытаниях на пятигорелочном отсеке реальной КС авиадвигателя пятого поколения ПД-14 ЭКСФМ с пневматической форсункой в АО «ОДК-Авиадвигатель» при воздействии на керосин переменного электрического поля с изменяющейся амплитудой и частотой на режиме малого газа работы авиадвигателя, происходит уменьшение СО в исходящих продуктах горения на 10,61% по сравнению с базой; уменьшение концентрации несгоревших углеводородов НС - на 57,3%. Все это свидетельствует об улучшении параметров распыла топлива и увеличении полноты сгорания топлива;

– показано, что разработанные ЭКСФМ при подаче электрического напряжения на электроды обеспечивают среднезауэтеровский 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.

Предложенные методы расчета и проектирования ЭКСФМ использованы в АО «ОДК-Авиадвигатель» при разработке конструкторской документации, разработке и выпуске экспериментальных серий образцов форсунок (как элементов ЭКСФМ) и ЭПФ с дальнейшей верификацией экспериментом.

Научное предвидение, грамотная постановка научных и практических задач, целеустремленность в достижении результатов исследований и разработок, их успешная патентная защита и публикация в индексируемых в базе Scopus и рекомендуемых ВАК зарубежных и отечественных изданиях, их внедрение в ведущих авиадвигателестроительных предприятиях и организациях РФ, проявленные автором во время работы над докторской диссертацией, характеризуют Колодяжного Д.Ю. как сложившегося ученого, обладающего высоким научным потенциалом.

Считаю, что диссертация Колодяжного Дмитрия Юрьевича соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г, и соответствует научной специальности 05.07.05– «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». Ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Научный консультант,  
Заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
доктор технических наук, профессор кафедры Транспортные  
и технологические системы Санкт-Петербургского  
политехнического университета Петра Великого

Владимир Степанович Нагорный

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29  
Тел.: 8(812) 552-60-88  
E-mail: nagorny.vladim@yandex.ru

