

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.217.03, СОЗДАННОГО  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 05.06.2018 г. №6

о присуждении Крюкову Юрию Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка методов математического моделирования ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», принята к защите 29 марта 2018 года, протокол № 4, диссертационным советом Д 212.217.03, созданным приказом Минобрнауки России №714/нк от 02.11.2012 г. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» Министерства образования и науки Российской Федерации, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Соискатель Крюков Юрий Александрович, 1985 года рождения, в 2011 году с отличием окончил ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет» по специальности «Прикладная математика и информатика»; в период подготовки диссертации с 2011 по 2015 гг. обучался в заочной аспирантуре ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет», который на основании приказа Министерства образования и науки №608 от 22.06.2015 г. был присоединен к ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», который в свою очередь на основании приказа Министерства образования и науки №379 от 06.04.2016 г. был переименован в федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», работает в акционерном обществе «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара) в должности инженера-конструктора I категории.

Диссертация в виде рукописи выполнена на кафедре «Математическое моделирование в механике» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства образования и науки Российской Федерации. Научный руководитель – Клюев Николай Ильич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математическое моделирование в механике» ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева».

**Официальные оппоненты:** Дерюгин Юрий Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров; Кудинов Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» дали положительные отзывы о диссертации.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, в своем положительном заключении, подписанным Вельмисовым Петром Александровичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой «Высшая математика» и Крашенинниковым Виктором Ростиславовичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Прикладная математика и информатика», и утвержденным Ярушкиной Надеждой Глебовной, первым проректором - проректором по научной работе, доктором технических наук, профессором, указала, что диссертация Крюкова Юрия Александровича выполнена на достаточно высоком научном уровне. Полученные автором результаты исследований подтверждают обоснованность сформулированных им выводов, положений и рекомендаций. Диссертационная работа Крюкова Ю.А. имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» и удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор – Крюков Юрий Александрович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

В замечаниях отмечается, что соискателем в диссертации не отражено существование конечно-разностной схемы повышенного порядка аппроксимации для решения используемого им уравнения параболического типа; в постановку задачи, рассмотренной во второй главе, не включены процессы деформации зеркала свободной поверхности жидкости в баке, вибрации обечаек бака и уровнемера; для задачи о

движении частицы в пограничном слое не учтены нестационарные силы; поставлен вопрос о выборе диссертантом схемы со сравнительно низким порядком аппроксимации по маршевой координате для численного решения задачи внешнего пограничного слоя; отмечаются замечания по изложению, подаче и оформлению материала в диссертации.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ по теме диссертации, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ. Также им получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ по теме диссертации. Суммарный объем принадлежащего соискателю опубликованного материала составляет 3,13 печатных листов. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных работах, в которых содержатся основные научные результаты диссертации. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель принимал равное участие в постановке и формализации задач, лично разработал алгоритмы и программное обеспечение, и выполнил анализ экспериментальных и расчетных результатов исследований.

#### **Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

[1] Ключев, Н.И. Влияние жидкой пленки на сопротивление трения плоской пластины [Текст] / Н.И.Ключев, Ю.А. Крюков // Изв. вузов. Ав. техника. – 2014. – № 4. – С. 33-35. (Переводная версия статьи: Klyuev, N.I. Influence of fluid film on friction of a flat plate [Text] / N.I. Klyuev, Y. A. Kryukov // Russian Aeronautics. – 2014. – Vol 57. – No.4. – P. 372 - 377).

[2] Ключев, Н.И. Снижение трения на плоской пластине при наличии жидкой пленки на ее поверхности [Текст] / Н.И. Ключев, В. А. Фролов, Ю.А. Крюков // Вестн. Самарск. гос. аэрокосм. унив. им. ак. С. П. Королева (нац. иссл. унив.). – 2012. – №5-2(36) (2012): спец. вып. – С. 29-32.

[3] Крюков, Ю.А. Моделирование движения сферической капли в ламинарном пограничном слое Блазиуса с помощью пакета Ansys Fluent [Текст] / Ю.А. Крюков // Вестн. Сам. универ. Естеств. серия. – 2015. – № 3(2015). – С. 97-105.

[4] Крюков, Ю.А. Математическая модель колебания топлива в измерительном канале системы управления расходом топлива [Текст] / Ю.А. Крюков // Вестн. Самарск. гос. аэрокосм. унив. им. ак. С. П. Королева (нац. иссл. унив.). – 2016. – Т. 15 (2016). – № 1. – С. 207-217.

**На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы официальных оппонентов**, в которых отмечается актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость основных результатов работы, полнота отражений основных положений диссертации в публикациях и автореферате. Отмечается,

что диссертационная работа Крюкова Юрия Александровича отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и удовлетворяет требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

В положительном отзыве официального оппонента Дерюгина Ю.Н., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника, в качестве замечаний отмечается, что в положениях, выносимых на защиту, присутствует излишнее слово «разработанная», то есть на защиту должна выноситься непосредственно программа. К тому же в положениях, выносимых на защиту, по мнению оппонента, отсутствуют результаты, полученные диссертантом в работе при решении практических задач.

В положительном отзыве официального оппонента Кудинова И.В., к.т.н., доцента, содержатся следующие замечания к задаче об уровне свободной поверхности в уровнемере: не учтен вклад местных сопротивлений, в предложенной модели отсутствует слагаемое  $u \frac{\partial u}{\partial x}$  и учет его влияния на решение задачи; в материалах не отражено, что служит импульсом (движущей силой) в этой задаче, если начальное и граничные условия заданы равными нулю, не связано ли рассогласование уровней, в первую очередь, с градиентом давления в жидкости и, уже во вторую, – с инерционностью, и каким образом можно объяснить искривление профилей скорости в удлинителе. Другие замечания оппонента касаются вопроса о контроле сходимости решения задач, выполненных в пакете Ansys Fluent, а также о полученных автором оценках устойчивости для предложенных им нелинейных разностных схем на основе линейных задач. В модели для задачи о движении частицы в пограничном слое отсутствует слагаемое, учитывающее сопротивление среды, и подробно не описан вопрос о спорной (в настоящее время) величине и направлении силы Сэфмана.

**На автореферат диссертации поступило 4 положительных отзыва от:**

Лауреата государственной премии РФ, заслуженного деятеля науки и техники, д.т.н., профессора кафедры «Паровых и газовых турбин им. А.В.Щегляева» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва) Зарянкина Аркадия Ефимовича; д.т.н., профессора кафедры механики и математического моделирования Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь) Пенского Олега Геннадьевича; д.т.н., профессора кафедры «Прикладная математика, информатика и информационные системы» ФГБОУ ВО «Самарский

государственный университет путей сообщения» (г. Самара) Ермоленко Георгия Юрьевича; к.т.н., доцента, руководитель департамента CFD ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» (г. Самара) Ляскина Антона Сергеевича.

Все отзывы положительные, отмечают актуальность темы диссертации, научную новизну и практическую значимость основных положений работы. В отзывах отмечается, что диссертационная работа Крюкова Ю.А. отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания: для практического использования результатов диссертационного исследования конструкторами необходимо было бы указать оптимальные значения шагов интегрирования разностных схем; не указано сравнительное время выполнения программ, основанных для предлагаемых методах математического моделирования и традиционных методах; алгоритм решения сопряженной задачи целесообразнее было бы начинать с решения внутренней задачи, когда для её решения используется граничное условие с напряжением трения по Блазиусу, что позволило бы экономить расчетное время на машине; в чем новизна решения уравнений параболического типа, используемых автором во второй главе?; какова практическая применимость исследований диссертанта, изложенных им в третьей главе?; в чем отличие работы диссертанта над задачей движения частицы в пограничном слое от аналогичной работы профессора МЭИ Дейча М.Е.; в тексте есть опечатка:  $Re_x \leq 5 \cdot 10^5$ , так как это число  $Re$  соответствует нижней границе автомодельности турбулентного пограничного слоя;

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается их высокой научной компетентностью в области математического моделирования, в том числе – течений вязкой жидкости, разработке численных методов и комплексов программ, что подтверждается публикациями в научных изданиях в сфере исследования соискателя.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** методы математического моделирования неустановившегося и квазистационарного течений в цилиндрическом канале с расходом массы, позволяющие оценить рассогласование уровня свободной поверхности жидкости в уровнемере относительно уровня в баке ракеты-носителя, и метод математического моделирования двухсредного неперемешивающегося пограничного слоя со скользящей межфаз-

ной границей, позволяющий находить его характеристики в зависимости от чисел Рейнольдса внутреннего и внешнего пограничных слоев и угла наклона плоской полубесконечной пластины, что отличает его от известных методов;

**предложена** нелинейная неявная конечно-разностная схема для системы интегро-дифференциальных уравнений пограничного слоя, позволяющая определить функцию толщины пограничного слоя из отдельного уравнения и отказаться от итерационных процедур наращивания сетки в поперечном направлении (как в известном алгоритме), и модификация алгоритма разностного решения квазилинейного одномерного уравнения параболического типа с постоянными коэффициентами с целью определения функции источника;

**доказана** перспективность использования программного обеспечения, разработанного на основе предложенных в диссертации методов математического моделирования, позволяющего оценивать гидродинамические процессы в уровнемере системы управления расходом топлива ракеты-носителя, и оценивать аэродинамические характеристики плоских элементов корпуса летательного аппарата в случае появления на них жидкой пленки.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** эффективность разработанных разностных методов решения краевой задачи для квазилинейного одномерного параболического уравнения с неизвестным источником и системы интегро-дифференциальных уравнений пограничного слоя, включающую уравнение верхней границы, применительно к анализу рассогласования уровней свободной поверхности жидкости в системе управления расходом топлива ракеты и к изучению характеристик двухсредного пограничного слоя, расширяющих возможности применимости классических методов вычислительной математики, ограниченных в основном классом задач с заданными наперед источниками и уравнениями пограничных слоев без явной верхней границы.

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы** разработанный приближенный асимптотический метод разложения решения системы уравнений внутреннего пограничного слоя в ряд по малому параметру и численный метод конечных разностей для решения задач о рассогласовании уровней свободной поверхности жидкости в системе управления расходом топлива ракеты-носителя и о двухсредном пограничном слое;

**изложены** этапы и алгоритмы применения разработанных методов математического моделирования и численного исследования характеристик двухсредного пограничного слоя, процессов движения частицы в пограничном слое и рассогласования уровней свободной поверхности в системе управления расходом топлива ракеты-носителя;

**раскрыт** колебательный во времени характер рассогласования уровней свободной поверхности в системе управления расходом топлива ракеты-носителя, раскрыто свойство пограничного слоя на плоской полубесконечной пластине: коэффициент трения двухсредного пограничного слоя меньше соответствующего коэффициента односредного пограничного слоя; раскрыто, что движение сферической частицы в односредном пограничном слое происходит под действием сил инерции, тяжести, аэродинамического сопротивления и силы Сэфмана.

**изучена** причина рассогласования уровней свободной поверхности в системе управления расходом топлива ракеты-носителя, которой является инерционность вязкой жидкости; изучена причина снижения вязкостного трения двухсредного пограничного слоя по сравнению с односредным – сила тяжести, разгоняющая внутренний и внешний пограничные слои.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** методики моделирования и численного исследования характеристик двухсредного пограничного слоя со скользящей межфазной границей на плоской поверхности и процесса колебаний свободной поверхности жидкости в измерительном канале системы управления расходом топлива ракеты-носителя в проектных расчетах профильных отделов АО «РКЦ Прогресс» (г. Самара).

**определены** границы области применения разработанных методов математического моделирования с целью практического использования теоретических результатов, полученных в диссертации, для прогнозирования рассогласования уровней свободной поверхности жидкости в системе управления расходом топлива ракеты-носителя и для исследования свойств двухсредного пограничного слоя и параметров движения сферической частицы в односредном пограничном слое на плоской пластине;

**созданы** программы для ЭВМ, позволяющие проводить вычислительные эксперименты по исследованию процесса рассогласования уровней свободной поверхности жидкости в системе управления расходом топлива ракеты-носителя, двухсредного пограничного слоя и параметров движения сферической частицы в односредном пограничном слое на плоской пластине;

**представлены** рекомендации по использованию аналитического приближенного метода разложения решения в ряд по малому параметру и численного метода конечных разностей для решения задач течений вязкой несжимаемой жидкости в слое с межфазной границей.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**теория** построена на основе преимущества полученных новых теоретических результатов с известными сведениями для вязкой несжимаемой жидкости из

теории ламинарного пограничного слоя и нестационарного ламинарного движения по круглому цилиндрическому каналу, когда существующие классические результаты являются частным случаем предложенных моделей и методов.

**идея базируется** на обобщении и развитии известных аналитического приближенного и конечно-разностного методов решения модельных краевых задач течений вязкой несжимаемой жидкости с межфазной границей.

**использованы** результаты, полученные ранее для ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости, для сравнения их с результатами, полученными диссертантом в частных случаях;

**установлено** качественное и количественное соответствие авторских результатов с известными аналитическими решениями в частных случаях и данными из независимых источников.

**Личный вклад соискателя состоит** в совместной с соавторами постановке задач, проведении численного решения и его исследовании, анализе и систематизации результатов расчетов, а также в самостоятельной постановке некоторых краевых задач, разработке алгоритмов их численного решения, реализации в виде программ для ЭВМ и проведении расчетов.

На заседании №6 05 июня 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Крюкову Юрию Александровичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов наук по специальности 05.13.18, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени 19, против присуждения учёной степени 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Радченко Владимир Павлович

Зотеев Владимир Евгеньевич

5 июня 2018 г.