

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03.04.2019 протокол № 5

О присуждении Сафронову Андрею Александровичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 28.01.2019г., (протокол заседания № 2) диссертационным советом Д 002.110.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru, (495) 485-8345), утвержденным приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.02.2013 г. № 75/нк.

Соискатель Сафронов Андрей Александрович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Московский физико-технический институт (государственный университет) (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9).

В 2018 году окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (государственного университета).

Диссертация выполнена в Отделении 6 Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центр Келдыша».

Работает инженером отделения 6 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, академик РАН Коротеев Анатолий Анатольевич, директор Научно-образовательного инновационного центра «Новые космические технологии и наземные высокотехнологичные процессы», Московский авиационный институт (кафедра 208).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Бухаров Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Исследовательский центр высоких технологий», ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет МЭИ (НИУ МЭИ) (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14);

кандидат физико-математических наук Орлов Денис Михайлович, старший научный сотрудник Сколковского института науки и технологий (143025, Московская область, Одинцовский район, Новоивановское городское поселение, деревня Сколково, ул. Новая, д. 100)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара, ул. Земеца, д. 18) в своем положительном заключении, составленном заместителем генерального конструктора по научной работе, кандидатом технических наук Борисовым Максимом Владимировичем и главным конструктором – начальником отделения 1550 Китаевым Александром Ириковичем, утвержденном первым заместителем генерального директора – генеральным конструктором Ахметовым Равилем Нургалиевичем, указала, что диссертация выполнена на актуальную тему, результаты, полученные лично диссертантом, способствуют расширению области знаний о закономерностях капиллярного распада сильновязких струй

и их радиационного остывания. Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в профильных организациях, занимающихся проектированием элементов и систем ракетно-космической техники, таких как ПАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва», АО «Конструкторское бюро «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), ФГУП Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева.

Соискатель имеет 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 6 – в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, более 15 тезисов в сборниках трудов конференций, получено 2 патента:

Основные работы:

1. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Влияние структуры капельной пелены на мощность бескарасных космических излучателей и эффективность энергетических установок // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 5. С. 817–820.
2. Сафронов А.А. Особенности капиллярного распада струй жидкости при числах Онезорга больше единицы // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. №1. С. 176–185.
3. Сафронов А.А., Филатов Н.И., Коротеев А.А., Бондарева Н.В. Установление температуры в дисперсных потоках бескарасных систем теплоотвода в космосе // Теплофизика и аэромеханика. 2017. №6. С. 985—988.
4. Григорьев А.Л., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Автомодельные закономерности образования микросателлитов в процессе капиллярного распада вязких струй // Теплофизика и аэромеханика. 2018. №4. С. 599–609.
5. Сафронов А.А., Коротеев А.А., Филатов Н.И. Установление температуры в радиационно остывающем дисперсном потоке при наличии внешнего

теплового излучения // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 6. С. 168–174.

6. Safronov A.A., Koroteev A.A., Filatov N.I., Grigoriev A.L. The effect of long-range interactions on development of thermal waves in the radiation-cooling dispersed flow // Russian journal of nonlinear dynamics. 2018. V. 14. N. 3. P. 343–354.

7. Сафронов А.А. Расчёт максимальной тепловой мощности космического капельного холодильника-излучателя // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. Вып. 65.

8. Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А. Решение краевой задачи для уравнения Пуассона для движущейся заряженной капельной пелены в форме прямоугольного параллелепипеда // Электричество. 2014. № 7. С. 11–16.

9. Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А. Методы расчета закономерностей функционирования генераторов капель и испарения рабочего тела в открытых космических излучательных системах // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2014. № 7. С. 3–9.

10. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Особенности теплового расчета открытых систем отвода низкопотенциального тепла в космосе // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2014. №12. С. 29—33.

11. Бондарева Н.В., Глухов Л.М., Коротеев А.А., Красовский В.А., Кустов Л.М., Нагель Ю.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И., Черникова Е.А. Бескаркасные системы отвода низкопотенциального тепла в космосе: успехи отработок и нерешённые задачи // Известия Академии Наук. Энергетика. 2015. №4. С. 130–142.

12. Бондарева Н.В., Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И., Шишканов И.И. Оптимальные режимы функционирования бескаркасных космических излучателей с кремнийорганическим сверхвысоковакуумным теплоносителем // Известия Академии Наук. Энергетика. 2016. №5. С. 78–90.

13. Коротеев А.С., Коротеев А.А., Нагель Ю.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Способ работы капельного холодильника-излучателя (варианты). Патент RU 2532629.

14. Завьялов И.Н., Негодяев С.С., Завьялова Н.А., Михайлов И.М., Шашин И.Н., Автайкин С.В., Сафронов А.А., Григорьев А.Л. Способ работы капельного холодильника-излучателя. Патент RU 2668386.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ведущий научный сотрудник Центра наногетероструктур, д.т.н. В.Н. Коваленко, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26). Отзыв положительный, с замечаниями:

К недостаткам работы следует отнести отсутствие анализа возможности использования обнаруженных волновых явлений для управления энергетическими характеристиками излучателя. Кроме того, ряд интересных результатов, касающихся устойчивости радиационного остывания, получен в рамках подхода к изучению капельной пелены как дискретной среды. Вместе с тем, хотелось бы видеть всесторонний анализ возможности существования этих эффектов и в сплошной среде. Также весьма интересным является упомянутое, но не раскрытое влияние на устойчивость процесса отвода тепла от КХИ факторов деформации капельного потока, в частности, связанных с наличием пространственного электрического заряда, причем не только за счет электризации при истечении из генерирующего устройства, но и за счет воздействия внешнего излучения космического пространства. Последние факторы, переменные по траектории полета, могут быть весьма существенными для свободно распространяющегося в открытом космосе капельного потока диспергированной пелены сверхвысоковакуумных теплоносителей как на основе традиционных жидких диэлектриков, так и принципиально новых рабочих тел для КХИ на основе проводящих ионных жидкостей.

2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ВРИО директора, руководитель лаборатории химических проблем энергетики, д.т.н. И.Ю. Кручинина, 199034, Санкт-Петербург наб. Макарова, д. 2). Отзыв положительный, с замечаниями: В качестве недостатка работы следует отметить некоторую разнородность исследуемых явлений, из-за чего главы диссертации выглядят изолированными.

3) ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) (профессор кафедры 601 д.т.н., профессор А.В. Ненарокомов, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4). Отзыв положительный, с замечаниями:

Недостатком работы является недостаточно подробное описание параметров работы генератора капельного потока во время проведения экспериментов. В частности, не приведены значения амплитуды акустического поля во внутреннем объеме генератора капель. Несмотря на отмеченное замечание, диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

4) МГТУ им. Н.Э. Баумана (доцент кафедры газотурбинных и нетрадиционных энергоустановок, к.т.н., доцент А.Н. Арбеков, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1). Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Отсутствует экспериментальное подтверждение результатов, полученных автором диссертации при численном моделировании радиационного остывания диспергированной пелены.

2. Из представленного в автореферате материала не ясно, каким образом учитываются особенности теплообмена в угловых струях теплоносителя капельного холодильника-излучателя. Кроме того в тексте автореферата имеется ряд положений, сформулированных не совсем четко, так на стр. 4 это касается радиационного теплообмена вещества низкотемпературных теплоносителей и введенного на стр. 9 термина «толщина струи», который на стр. 12 назван радиусом.

**5) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук**

(научный сотрудник лаборатории 501, к.т.н. И.А. Шашкова, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32).

Отзыв положительный, с замечаниями:

В работе подробно исследовано развитие гидродинамических неустойчивостей капиллярного течения в тонкой перетяжке, соединяющей зародыши капель. Однако не приведены ни расчеты, ни экспериментальные измерения скорости движения образовавшихся микросателлитов относительно основных капель. Кроме того, не исследовано взаимодействие микросателлитов с образовавшимися каплями большого размера и не дан ответ на вопрос: будет ли происходить процесс коагуляции частиц, или же они упруго отразятся после столкновения.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- **д.т.н. Бухаров А.В.** является одним из ведущих ученых в области исследования теплофизических проблем получения стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель.

1. Бухаров А.В., Дмитриев А.С. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике : [монография] / А.В. Бухаров, А.С. Дмитриев. Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ "МЭИ"). – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 143 с. SBN 978-5-7046-1419-7.

2. Bukharov A., Buescher M., Gerasimov A. Dynamics of Cryogenic Jets: Non Rayleigh Breakup and Onset of Non-Axisymmetric Motions // Phys. Rev. Lett. 100:174505, 2008.

3. Technical design report for the PANDA (Anti Proton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab, A. Boukharov at al. // The European Phys. J. 2013. V. 49. No 2. P. 25.

- **к.ф.-м.н. Орлов Д.М.** является признанным специалистом в области моделирования течения газа и плазмы применительно к задачам аэродинамики летательных аппаратов, а также к задачам течения жидкости через нестационарные дисперсные среды.

1. Б.А. Григорьев, А.Е. Рыжов, Д.М. Орлов, Н.В. Савченко, А.П. Федосеев Особенности фильтрационного течения через нестационарные дисперсные среды, представленные засоленными терригенными породами-коллекторами // Вести газовой науки: Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. № 2 (18). С. 90-97.

2. Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. О возможности управления трансзвуковым обтеканием профилей с помощью подвода энергии на основе наносекундного разряда типа «плазменный лист» // ЖТФ. 2009. Т. 79. №. 3. С. 17-27.

3. Орлов Д.М., Рыжов А.Е., Перунова Т.А. Методика определения относительных фазовых проницаемостей по данным нестационарной фильтрации путем совместного физического и компьютерного моделирования // ПМТФ. 2013. Т. 54. № 5. С. 119-128.

Выбор **«Ракетно-космического центра «Прогресс»** в качестве ведущей организации обусловлен тем, что АО «РКЦ «Прогресс» – ведущее российское предприятие и один из лидеров мировой космической отрасли в области разработки, производству и эксплуатации ракет-носителей среднего класса. АО «РКЦ «Прогресс» является крупным отечественным предприятием по разработке космических аппаратов научного и прикладного назначения, многие из которых не имеют аналогов в мире.

1. Абрашкин В.И., Воронов К.Е., Дорофеев А.С., Пияков А.В., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Сёмкин Н.Д., Филипов А.С., Чебуков С.Ю. Определение

вращательного движения малого космического аппарата «Аист-2Д» по данным научной аппаратуры КМУ-1 // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 1. С. 61 – 73.

2. Богданович В.И., Ломовской О.В., Зотов Е.А., Небога К.В., Гиорбелидзе М.Г. Оценка технологичности трубопроводов пневмогидравлической системы подачи ракеты-носителя // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. №1. С. 144 – 152.

3. Зайцев В.В., Карлов А.В., Федюнин Э.Ю. О генерации третьей гармоники автоколебаний в схемах Хартли и Мейснера // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 2. С. 26 – 29.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- создан метод расчёта капиллярного распада вязких струй теплоносителей, потенциально пригодных для использования в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе; показано хорошее соответствие результатов численного расчёта с экспериментальными данными;
- разработана модель образования микросателлитов в процессе капиллярного распада сильновязких струй;
- сформулированы рекомендации по определению оптимальных параметров работы генераторов капель бескаркасных космических излучателей;
- создан универсальный метод расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя;
- разработана методика расчёта кинетических коэффициентов переноса излучения в капельном потоке;
- установлены закономерности нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной капельной пелены;
- сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры капельного потока.

Научная значимость исследования обоснована тем, что:

- разработана методика расчета процесса вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей в области значений числа Онезорге порядка единицы; определены зависимости размеров основных и сателлитных капель от волнового числа инициирующего распад возмущения для различных значений числа Онезорге;
- проведено экспериментальное измерение размеров основных и сателлитных капель; подтверждено соответствие полученных результатов с расчётными;
- впервые выявлено наличие режима автомобильного утончения струй ньютоновых жидкостей, влияющего на формирование микросателлитов при капиллярном распаде вязких струй; разработана физико-математическая модель соответствующего процесса;
- разработана методика расчета кинетических коэффициентов переноса излучения в структурированном капельном потоке низкопотенциального капельного холодильника - излучателя;
- получены аналитические зависимости, описывающие поле температуры в капельной пленке низкопотенциальных капельного холодильника – излучателя;
- выявлены закономерности распространения тепловых волн в радиационно остывающих дисперсных потоках. Разработана физико-математическая модель волновых процессов, сопровождающих процесс распространения тепловых волн.

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

- Разработан вычислительно-программный комплекс, позволяющий численно моделировать процесс вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей при значении числа Онезорге, близком к единице. Выявленные закономерности образования микросателлитов в процессе капиллярного распада струй позволяют определять области параметров, в которых процесс вынужденного капиллярного распада происходит без образования сателлитных капель.

- Разработан вычислительно-программный комплекс, позволяющий численно моделировать процесс радиационного остывания капельного потока низкопотенциального капельного холодильника-излучателя. Создана база данных, содержащая информацию об остывании капельных потоков с различной структурой, размером частиц и теплофизическими характеристиками рабочего тела. База данных позволяет определять оптимальных геометрических параметров бескаркасных космических излучателей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах технической термодинамики, физической химии и теплофизики. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- идея диссертационной работы базируется на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования, обобщении опыта работы других научных групп, лабораторий и технологических компаний;
- установлено качественное совпадение авторских результатов и представлений с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя в получении научных результатов диссертации является определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. А.А. Сафроновым разработана методика расчёта капиллярного распада вязких струй теплоносителей, потенциально пригодных для использования в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. При его непосредственном участии проведены экспериментальные исследования, показавшие соответствие результатов численного расчёта с экспериментальными данными. Автором разработана физико-математическая

модель образования микросателлитов в процессе капиллярного распада сильновязких струй. А.А. Сафронову принадлежит определяющая роль в разработке универсального метода расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя. Автором диссертации лично разработана физико-математическая модель нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной капельной пелены. При непосредственном участии А.А. Сафронова сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры капельного потока. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании от 03.04.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Сафронову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **19** человек, из них **6** докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы и **13** докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании из **25** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за **19**, против **0**, недействительных бюллетеней **0**.

Председатель диссертационного совета Д 002.110.03

чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Вараксин А.Ю.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

д.т.н.

Директор Л.Б.

03.04.2019 г.