

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Сафронова Андрея Александровича

«Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа А.А. Сафронова посвящена моделированию основных составляющих рабочего процесса бескаркасных систем отвода низкопотенциального тепла в космосе. С этой целью установлены и проанализированы закономерности функционирования капельных холодильников-излучателей. Основное внимание уделено экспериментально-теоретическому исследованию процесса формирования капельного потока при вынужденном капиллярном распаде струй, а также моделированию радиационного остывания структурированного дисперсного потока.

Результаты диссертационной работы изложены на 163 страницах. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации. Результаты опубликованы в 12 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 6 из которых индексируются в информационно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus.

Во введении описаны цели диссертационной работы, актуальность, научная и практическая значимость работы, приведена информация об апробации работы и приведено обоснование достоверности полученных результатов.

В первой главе проведен обзор литературных и патентных источников по теме диссертации. Рассмотрено развитие концепций бескаркасных систем теплоотвода, составлен обзор технических предложений по использованию технологии капельного холодильника-излучателя для решения различных задач космонавтики, обсуждены результаты исследований синтеза сверхвысоковакуумных теплоносителей, подробно описаны российские

космические эксперименты с моделями капельных холодильников-излучателей на борту космических станций «Мир» и Международной космической станции. Рассмотрены существующие методики моделирования процессов капиллярного распада сильно вязких струй и радиационного остывания дисперсных потоков. Показано, что существующие модели не позволяют всесторонне описать эти процессы.

Во второй главе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования процесса вынужденного капиллярного распада сильно вязких струй при величине безразмерного числа Онезорге, близкой к единице. Предложена методика расчета зависимости размеров основных и сателлитных капель, образовавшихся в результате распада, от безразмерного волнового числа инициирующего распад возмущения. Осуществлена экспериментальная проверка этой зависимости, показано хорошее согласование теории с экспериментом. Описано экспериментально обнаруженное явление образования микросателлитов при разрыве жидких тонких перетяжек, соединяющих зародыши капель. Теоретически описаны процессы формирования зародышей микросателлитов и их отрыва.

В третьей главе диссертации приведены результаты теоретического моделирования переноса излучения в структурированном капельном потоке. Разработана физическая модель сложного теплообмена в капле, показано что в исследуемой области параметров достаточную для практического применения точность обеспечивает использование моделей геометрической оптики и серого тела. Решено уравнение переноса излучения в структурированном дисперсном потоке, рассчитаны кинетические коэффициенты переноса излучения в капельной пелене. Методом асимптотических разложений получены решения интегро-дифференциальных уравнений радиационного остывания капель, позволяющие рассчитывать поле температуры в дисперсной среде с заданной точностью. Численно решена задача радиационного остывания капель, определены характеристики натуральных излучателей. Предложена методика расчета оптимальных параметров капельного холодильника применительно к заданным характеристикам энергетической системы космического аппарата.

В четвертой главе проведено исследование устойчивости радиационного остывания дисперсного потока по отношению к возмущениям поля температуры в нем, а также малым изменениям его геометрических

параметров. Проанализирован процесс установления равновесного профиля температуры. Выявлено наличие волновых процессов, сопровождающих установление. Предложена аналитическая модель волновых процессов, численно и аналитически рассчитана их интенсивность. Показано, что при некоторых условиях процесс радиационного остывания дисперсного потока теряет устойчивость.

В заключении отмечены наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы, которые могут быть сведены к следующему.

1. 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.

2. Разработана модель образования микросателлитов в процессе капиллярного распада сильновязких струй.

3. Сформулированы рекомендации по определению оптимальных параметров работы генераторов капель бескаркасных космических излучателей.

4. Создан универсальный метод расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя.

5. Разработана методика расчёта кинетических коэффициентов переноса излучения в капельном потоке.

6. Установлены закономерности нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной капельной пелены.

7. Сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры потока.

В автореферате сформулированы актуальность и цель работы, описаны использованные методы исследования, обоснована достоверность полученных результатов, их научная новизна и практическая значимость, указаны научные положения, выносимые на защиту, приведена информация об апробации работы, описаны структура и объем диссертации, краткое

содержание работы по главам, результаты работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. В первой главе диссертации описывается альтернативный КХИ способ создания бесконтактного отвода тепла - плёночный холодильник-излучатель. От КХИ он отличается тем, что из рабочего тела создаётся не капельный поток, а плёнка жидкости. Из текста диссертации осталось не ясным, чем капельный холодильник-излучатель лучше плёночного.
2. Во второй главе на рис. 2.9 приведены результаты расчёта зависимости радиуса основных R_m и сателлитных R_s капель от безразмерного волнового числа возмущения для различных значений числа Онезоге. Выводы, сделанные по этому рисунку, требуют пояснений:
 - а. Желательно пояснить, как выполнены расчеты радиусов основных R_m и сателлитных R_s капель (добавить или сослаться на соответствующие выражения);
 - б. В работе говорится «Из рисунка видно, что в области значений числа Онезоге $Oh \in [0,2; 2]$, образование сателлитных капель наименее вероятно». Тем не менее, на рисунке во всем диапазоне волнового числа и чисел Онезоге приведены рассчитанные значения радиусов основных и сателлитных капель.
 - с. Из рисунка видно, что результаты расчета радиусов основных и сателлитных капель методом сшивки асимптотического решения и автомодельного решения близки результатам расчета на основе только асимптотического решения. Означает ли это, что для инженерных расчетов можно использовать только асимптотическое решение для прогноза образования сателлитов?
3. В конце каждой главы не хватает структурированных выводов о том, на какие вопросы разработанные решения способны дать ответ, а на какие нет. Например, не совсем ясно, позволяют ли результаты раздела 2 рассчитывать размеры микросателлитов при разрыве струи или нет?

4. В диссертации не затронут вопрос влияния переоблучения на формирование капельного потока. Желательно добавить в выводы рассуждения на данную тему.
5. Оформление диссертации и автореферата имеет ряд недостатков стилистического характера, допущены пунктуационные ошибки и ошибки в нумерации рисунков.

Указанные замечания не носят принципиального характера. В целом диссертационная работа А.А. Сафронова представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, характеризующееся новизной и практической значимостью результатов. Высказанные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Актуальность темы диссертации подтверждается выполнением работы в соответствии с перечнем Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ и критических технологий РФ (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899): пункт 7 перечня приоритетных направлений развития науки, технологий и техники – «Транспортные и космические системы», а также в соответствии с пунктом 24 перечня критических технологий – «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения». Решение новых научно-технических и информационно-телекоммуникационных задач, связанных с использованием космического пространства, предполагает значительное повышение энерговооружённости космических аппаратов. Наиболее проблемной частью их энергетических установок является система отвода тепла. Площадь поверхности, масса и метеоритная уязвимость классических панельных излучателей быстро возрастают при повышении отводимой мощности. Бронирование поверхностей уменьшает метеоритную уязвимость, но неприемлемо повышает массу конструкции. Выходом представляется использование бескаркасных систем отвода тепла, создание которых невозможно без выявления закономерностей капиллярного распада струй высоковакуумного теплоносителя, а также радиационного остывания структурированного дисперсного потока. В этой связи направленная на решение этих задач диссертационная работа А.А. Сафронова несомненно является актуальной.

Научная новизна представленных в диссертации результатов характеризуется созданием методики расчета процесса вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей в области значений числа Онезорге порядка единицы. Проведено экспериментальное измерение размеров основных и сателлитных капель; подтверждено соответствие полученных результатов с расчётными. Впервые выявлен и теоретически описан режим автомодельного утончения струй ньютоновых жидкостей, влияющий на формирование микросателлитов при капиллярном распаде сильно вязких струй. Выявлены закономерности распространения тепловых волн в радиационно остывающих дисперсных потоках. Разработана физико-математическая модель волновых процессов, сопровождающих процесс распространения тепловых волн.

Степень достоверности результатов проведённых исследований обосновывается корректным использованием фундаментальных законов и математического аппарата, обоснованностью принятых допущений, соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, использованием высокоточной поверенной и аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры, а также согласованием результатов тестовых расчетов с результатами работ, опубликованных ранее другими авторами. Основные положения диссертации опубликованы в журналах, рецензируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, а также обсуждались на семинарах и конференциях различного уровня.

Научная значимость работы заключается в расширении знаний о закономерностях капиллярного распада сильно вязких струй, а также о закономерностях радиационного остывания дисперсных потоков. Впервые теоретически определена зависимость размеров капель, образовавшихся в результате капиллярного распада струй, от числа Онезорге, характеризующего относительную величину сил вязкого трения; получено экспериментальное подтверждение теоретически рассчитанной зависимости. Предложена оригинальная модель процесса формирования микросателлитных капель при утончении жидкой перетяжки, соединяющей зародыши образующихся в результате капиллярного распада капель. Описаны волновые процессы, сопровождающие установление равновесного профиля температуры радиационно остывающего дисперсного потока.

Практическая значимость работы заключается в определении оптимальных режимов вынужденного капиллярного распада струй сильно вязких жидкостей, не сопровождающихся образованием сателлитных капель малого размера. Кроме того, в работе разработана методика проектирования оптимальной геометрической структуры капельного потока применительно к заданным характеристикам энергетической системы космического аппарата.

Полученные автором результаты могут быть использованы 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.

Апробация работы. Основные положения работы были обсуждены на российских и международных конференциях: 56-й научной конференции МФТИ – Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (2013 г.), 7th European conference for aeronautics and space sciences EUCASS 2017 (Италия, Миланский технический университет), конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена» (2017 г., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) и еще на 6 российских конференциях.

А.А. Сафроновым разработана методика расчёта капиллярного распада вязких струй теплоносителей, потенциально пригодных для использования в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. 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. Сафроновым разработан универсальный метод расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке капельного холодильника-излучателя. Автором диссертации также разработана физико-математическая модель нестационарных процессов радиационного остывания диспергированной

капельной пелены. Сформулированы рекомендации по проектированию оптимальной геометрической структуры капельного потока.

Диссертационная работа «Исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Сафронов Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:


к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Сколковского института науки и технологий,

Тел. +7(495) 280-14-81 доб. 3512. E-mail: D.Orlov@skoltech.ru

Орлов Денис Михайлович

«11» марта 2019 г.



Вице-президент по развитию

Сколковского института науки и технологий

Тел.: +7 (495) 280 14 81 доб. 3218. E-mail: Safonov@skoltech.ru



Сафонов Александр Александрович

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», 121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра «Сколково», Большой бульвар д.30, стр.1, Тел.: +7 (495) 280 14 81, inbox@skoltech.ru