

На правах рукописи

САФРОНОВ Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАПЕЛЬНОГО
ПОТОКА И РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В
БЕСКАРКАСНЫХ СИСТЕМАХ ОТВОДА
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В КОСМОСЕ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в государственном научном центре – федеральном государственном унитарном предприятии «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»).

Научный руководитель: доктор технических наук,
академик РАН
Коротеев Анатолий Анатольевич
директор ЦНКТ МАИ (кафедра 208),
Московский авиационный институт.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бухаров Александр Васильевич
ведущий научный сотрудник НИЛ «Исследовательский центр высоких технологий»,
Московский энергетический институт;

кандидат физико-математических наук
Орлов Денис Михайлович
старший научный сотрудник,
Сколковский институт науки и технологий.

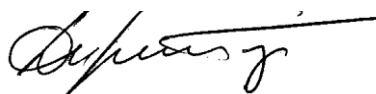
Ведущая организация: Ракетно-космический центр «Прогресс»
(г. Самара)

Защита состоится «3» апреля 2019 года в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13 стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <https://jiht.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Л.Б. Директор

1. Общая характеристика работы

Актуальность работы. 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 неприемлемо повышает массу конструкции. Выходом представляется использование бескаркасных систем отвода тепла [1]. Идея капельного холодильника-излучателя (КХИ) состоит в радиационном остывании специальным образом сгенерированного свободно распространяющегося в космосе капельного потока сверхвысоковакуумного теплоносителя с последующим улавливанием остывших капель и замыканием контура циркуляции рабочего тела. Принципиальная схема КХИ изображена на рис. 1.

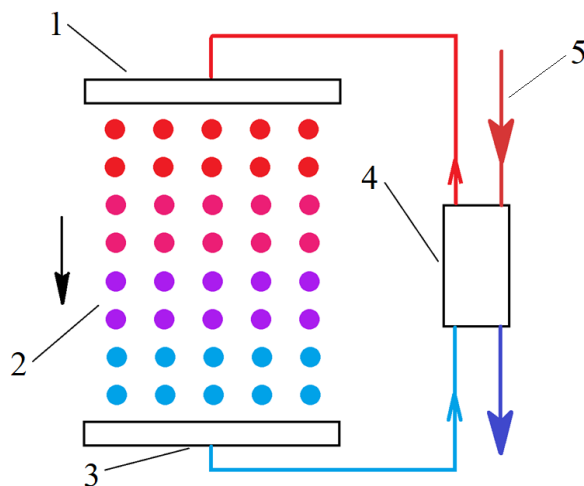


Рис. 1. Принципиальная схема КХИ. 1 – генератор капель; 2 – капельный поток; 3 – гидросборник; 4 – теплообменник; 5 – контур энергетической установки космического аппарата.

Капельный поток формируется методом вынужденного капиллярного распада струй (ВКРС). Рабочая жидкость должна обладать низкой испаряемостью. Удовлетворяющие этому требованию потенциальные рабочие тела имеют достаточно высокую вязкость, которая оказывает существенное влияние на процесс капиллярного распада. В диссертации исследуются особенности процесса вынужденного капиллярного распада вязких струй при близких к единице значениях числа Онезорге $On = \mu / \sqrt{r_0 \rho \sigma}$ (r_0 – радиус невозмущенной струи, а μ , σ и ρ – динамическая вязкость, поверхностное натяжение и плотность жидкости).

Выявленные закономерности распада вязких струй имеют не только прикладной, но и самостоятельный научный интерес, так как наблюдаемые при этом гидродинамические эффекты являются прямым следствием особенностей реализации фундаментальных автомодельных закономерностей разрыва струй ньютоновых жидкостей.

Для достижения приемлемых значений КПД энергетической установки космического аппарата необходимо понижать минимальную температуру теплового цикла. Сделать это можно с использованием низкопотенциальных КХИ с температурой капельного потока $T \sim 400$ К. Вещество потенциальных рабочих тел эффективно поглощает тепловое излучение с такой температурой. Ранее (см., например [2]) исследование остывания дисперсных потоков проводилось применительно к высокотемпературным КХИ. В последних $T > 600$ К, а тепловое излучение слабо поглощается каплями. В представленной работе рассмотрены процессы радиационного остывания капельного потока низкопотенциальных КХИ. Самостоятельный научный интерес представляют описанные волновые процессы, сопровождающие распространение тепловых волн в дисперсном потоке.

Цель работы: исследование процессов формирования капельного потока и радиационного теплообмена в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявление закономерностей вынужденного капиллярного распада струй вязких жидкостей при $On \sim 1$;
- разработка метода расчёта радиационного теплообмена в дисперсном потоке КХИ;
- выявление закономерностей процесса остывания дисперсного потока;
- определение оптимальной геометрической структуры потока капель.

Научная новизна работы:

1. 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.

2. Проведено экспериментальное измерение размеров основных и сателлитных капель; подтверждено соответствие полученных результатов с расчётными.

3. Впервые выявлено наличие режима автомодельного утончения струй ньютоновых жидкостей, влияющего на формирование микросателлитов при ка-

пиллярном распаде вязких струй. Разработана физико-математическая модель соответствующего процесса.

4. Разработана методика расчета кинетических коэффициентов переноса излучения в структурированном капельном потоке низкопотенциального КХИ.

5. Получены аналитические зависимости, описывающие поле температуры в капельной пелене низкопотенциальных КХИ.

6. Выявлены закономерности распространения тепловых волн в радиационно остывающих дисперсных потоках. Разработана физико-математическая модель волновых процессов, сопровождающих процесс распространения тепловых волн.

Практическая ценность. 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. Достоверность результатов подтверждается применением в исследованиях фундаментальных законов гидродинамики, сопоставлением результатов тестовых расчетов с опубликованными другими исследователями, а также сопоставлением результатов расчетов с экспериментом.

Разработан вычислительно-программный комплекс, позволяющий численно моделировать процесс радиационного остывания капельного потока низкопотенциального КХИ. Создана база данных тепловых расчетов, содержащая информацию об остывании капельных потоков с различной структурой, размером частиц и теплофизическими характеристиками рабочего тела. С её использованием становится возможным определение оптимальных геометрических параметров бескаркасных космических излучателей. Достоверность результатов подтверждается использованием в исследованиях фундаментальных законов теплообмена, современных аттестованных средств измерения, а также сопоставлением результатов тестовых расчетов с опубликованными другими исследователями.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод расчета вынужденного капиллярного распада вязких струй при значении числа Онезорге, близком к единице.

2. Результаты расчетно-теоретического и экспериментального исследований зависимости размеров капель, образующихся в процессе вынужденного капиллярного распада струй, от волнового числа, инициирующего распад возмущения при различных значениях числа Онезорге.

3. Закономерности образования микросателлитов при капиллярном распаде сильновязких струй.

4. Метод расчета кинетических коэффициентов переноса излучения в структурированном дисперсном потоке.

5. Результаты исследования радиационного остывания дисперсных потоков низкопотенциального КХИ произвольной оптической толщины.

6. Закономерности установления равновесного профиля температуры в радиационно остывающем дисперсном потоке.

7. Методика описания волновых процессов при распространении тепловых волн в радиационно остывающем дисперсном потоке.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены на ряде российских и международных конференций: 54-я научная конференция МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе», 2011; 55-я научная конференция МФТИ – Всероссийской молодёжной научной конференции «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», 2012; 11-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика – 2012», МАИ; 56-я научная конференция МФТИ – Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», 2013; XVII научная школа «Нелинейные волны – 2016», Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород; седьмая научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ФГУП «КБ Арсенал», 2016; 7th European conference for aeronautics and space sciences EUCASS 2017; XXI научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, ПАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва», 2017; конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена», 2017, на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого; Всероссийская конференция молодых ученых-механиков, 2018, организаторы: МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИ механики МГУ, РФФИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 6 – в изданиях, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа включает 163 страницы, 45 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 104 наименований.

2. Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность и новизна решаемых задач, практическая значимость работы, кратко изложены основные результаты исследования.

Первая глава – обзор литературных и патентных источников по рассматриваемой теме. В первой части главы рассмотрено развитие концепции бескапельных систем теплоотвода. Приведен обзор технических предложений по использованию технологии капельного холодильника-излучателя для решения задач позиционирования космических аппаратов при их групповом полете, освещения поверхности Земли отраженным солнечным светом и т.д. Рассмотрен комплекс исследований, направленных на синтез принципиально новых рабочих тел для КХИ на основе ионных жидкостей. Проанализированы экспериментальные и теоретические работы, посвященные задачам генерации и сбора капельного потока в условиях невесомости и глубокого вакуума, электризации диспергированной пелены под действием факторов космического пространства. Исследована история подготовки космических экспериментов с КХИ в России и США, проведён обзор работ, посвящённых российским космическим экспериментам с моделями капельных холодильников-излучателей на борту космических станций «Мир» и МКС.

Проведен обзор работ, посвященных численному и аналитическому моделированию радиационного остывания дисперсных потоков. Измерения спектральных свойств потенциальных рабочих тел показывают, что тепловое излучение с температурой $T \sim 400$ К эффективно поглощается веществом капель. А для излучения с температурой $T > 600$ К капли оказываются практически прозрачными и для моделирования процесса остывания используется приближение диффузного переноса излучения, неприменимое для низкопотенциальных КХИ. Для случая поглощающе-рассеивающего высокотемпературного ($T > 600$ К) плоского слоя излучательная способность капельной пелены зависит только от её оптической толщины и альбедо рассеяния частиц [3]. Эта закономерность становится справедливой после окончания переходного периода согласования распределения температуры и функции источника рассеяния. Для низкопотенциальных КХИ длительность переходного периода значительно превышает время пролёта капель. Поэтому их тепловой расчёт должен осуществляться с учетом переходных процессов. Их рассмотрение проводилось в работе [2] – с использованием модели распространения тепловой волны в среде с нелинейной теплопроводностью. Однако задача решалась численно в приближении диффузного переноса излучения, неприменимом для расчета низкопотенциальных излучателей.

В первой главе также обсуждены исследования капиллярного распада вязких струй. Показано отсутствие в настоящее время обоснованного решения задачи ВКРС при $On \sim 1$. Проанализированы работы, посвященные исследованию автомодельного разрыва тонких жидких перетяжек, соединяющих зародыши капель на завершающей стадии разрыва струи. Автомодельные закономерности разрыва являются универсальными, практически не зависят от начальной формы струи и реализуются на геометрических масштабах, меньших, чем величина $l_\mu = \mu^2 / (\sigma\rho)$. В литературе описаны два автомодельных режима утончения струй ньютоновских жидкостей. Так называемое стоксово решение реализуется в случае, когда пренебрежимо малы, по сравнению с силами вязкости и поверхностного натяжения, оказываются силы инерции. При этом форма струи симметрична относительно точки разрыва. В случае соизмеримости всех трех действующих сил реализуется так называемое универсальное решение автомодельного разрыва струи, асимметричное относительно точки разрыва. Возмущения его формы обусловлены наличием механизма итерационной неустойчивости: вблизи точки разрыва формируется новая область универсального автомодельного решения. Ранее при расчете автомодельных закономерностей разрыва струи использовалось предположение пренебрежимо малой величины её кривизны, обусловленной изменением формы в аксиальном направлении, по сравнению с величиной, равной обратному радиусу струи. В обзоре литературы нашли отражение нерешенные к настоящему времени задачи. Так, считается, что по мере развития стоксова решения должна происходить его трансформация в универсальное [4]. Однако в настоящее время механизм разрушения симметрии стоксова решения не описан.

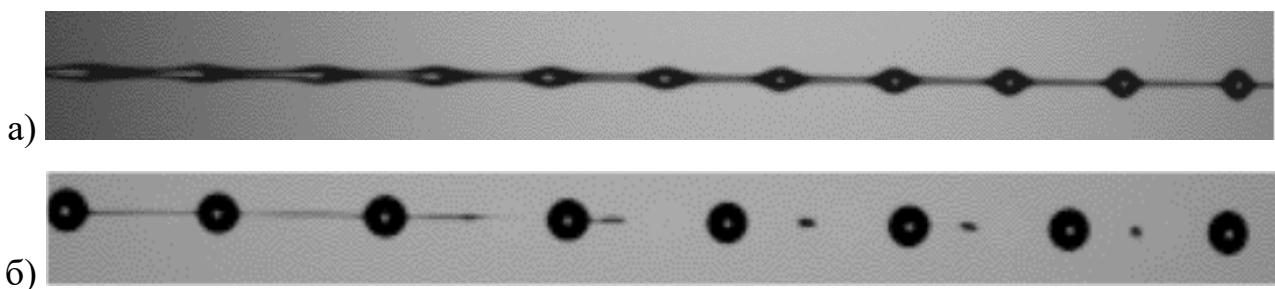


Рис. 2. Фотографии разных частей распадающейся на капли струи, $On = 0,65$.

Предмет исследования **второй главы** – вынужденный капиллярный распад струй ньютоновых жидкостей с числом Онезорге, близким к единице. ВКРС может происходить как монодисперсно, когда образуются только основные капли номинального радиуса, так и сопровождаться образованием сателлитных капель малого размера (рис. 2). Главными задачами этой части работы

являлись: разработка метода расчета размеров основных и сателлитных капель; экспериментальное определение размеров капель и сравнение результатов с теоретическими; выявление закономерностей формирования микросателлитов при капиллярном распаде струй.

Образование капель при распаде струи происходит в два этапа. Вначале экспоненциально растёт начальное возмущение, и формируются зародыши капель (рис. 2а). Рост зародышей замедляется, когда в них сосредотачивается большая часть вещества струи. Затем происходит автомодельный разрыв тонких жидких перетяжек, связывающих зародыши (рис. 2б). Первый этап называется процессом капиллярного распада, второй – разрывом струи. Расчет размеров основных и сателлитных капель проводился методом сшивки решений, описывающих рост капиллярных возмущений, с автомодельными закономерностями разрыва струи.

Задача решалась в безразмерных переменных. В качестве единицы длины выбирался радиус невозмущённой струи r_0 , времени – величина $t_0 = \sqrt{r_0^3 \rho / \sigma}$. Для обезразмеривания скорости использовалось отношение r_0/t_0 . В приближении длинных (по сравнению с радиусом струи) волн гидродинамическая система уравнений для вязкой струи записывается в виде [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{1}{h} \right) + 3On \left(\frac{2}{h} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{h}{2} \frac{\partial h}{\partial x}$$

где u – скорость вещества в струе, h – ее толщина, x и t – аксиальная координата и время. Исследование процесса развития в струе капиллярных возмущений проводилось с помощью асимптотического разложения гидродинамической системы уравнений в ряд по малой величине амплитуды начального возмущения поверхности струи.

Развитие возмущений конечной амплитуды моделировалось решением краевой задачи во втором порядке асимптотического разложения. При этом инициирующее ВКРС начальное возмущение поверхности струи описывалось зависимостью $h(t=0) = r_0 + \delta h \cdot \cos(kx) - \delta h^2 / 4$, где δh и $k = 2\pi r_0 / \lambda$ – безразмерные амплитуда и волновое число возмущения, а скорость вещества в струе в начальный момент времени считалась нулевой. Решение краевой задачи представляет собой сумму шести волн. Из них растущими оказываются только две волны, три затухают с разной скоростью, а одна сохраняет свою амплитуду. Динамика роста и затухания волн определяет процесс сателитообразования. Проведённый с помощью решения краевой задачи анализ показал, что в случае,

когда $\delta h < 0,15$, размеры образовавшихся в результате ВКРС капель практически не зависят от амплитуды инициирующего распад возмущения δh .

Исследование процесса роста малого начального возмущения ($\delta h < 0,1$) проводилось методом асимптотической стабилизации решения по начальным данным. Учитывались только растущие волны. Решение во втором порядке асимптотического разложения по δh представлялось в виде: $h = 1 + f \cos(kx) + g(k, Oh) f^2 \cos(2kx) - f^2 (1 + g^2 f^2) / 4$, где $f = e^{\omega t} \delta h$, а $\omega(k)$ – фактор роста волны с волновым числом k . Физический смысл величины g – интенсивность индуцирования исходной волной волны с удвоенным волновым числом. Из выражения, описывающего форму струи, следует, что образование сателлитов происходит в случае $g > 1/4$. На рис. 3 изображена зависимость $g(k)$, рассчитанная для различных значений числа Онезорге.

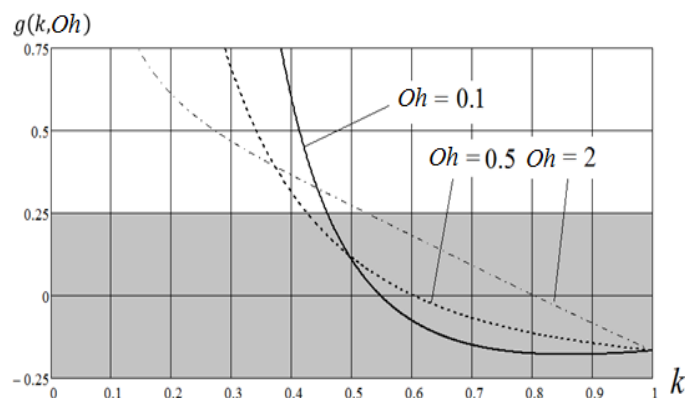


Рис. 3. Зависимость $g(k)$, рассчитанная для различных значений числа Онезорге. Закрашенная область соответствует безсателлитному распаду струи.

Задача исследования влияния на решение высших порядков асимптотического разложения решалась двумя способами. Сравнивались решения во втором и в третьем порядке разложения. Кроме того, система дифференциальных уравнений для расчета $i+1$ -го порядка разложения рассматривалась как отображение, сжимающее норму решения в i -м порядке. Оба метода показали, что для расчета размеров сателлитных капель достаточно решения во втором порядке асимптотического разложения, а высшие порядки лишь немного сдвигают положение границы образования сателлитов k^* .

Анализ соотношения сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения показывает, что при значении $Oh \sim 1$ в перетяжке, соединяющей зародыши капля (рис. 2б), величина сил инерции оказывается пренебрежимо малой, и разрыв струи происходит по стоксовой автомодельной закономерности. При выводе автомодельного уравнения уточнения предполагается, что в системе гидродинамических уравнений член $\partial_{xx} h$ пренебрежимо мал по сравнению с величиной $1/h$ [3]. При этом получается следующая редукция исходного динамическо-

го уравнения для вязкой струи: $\partial_x(1/h) = 3On\partial_x(h^2\partial_x u)/h^2$. Его совместное решение с уравнением неразрывности показывает, что при утончении струи её форма близка к параболической и симметрична относительно точки разрыва. В качестве условий сшивки асимптотического и автомодельного решений выбирались равенства кривизны и скорости поверхности струи. В результате проведения численного и аналитического исследований трансформации асимптотического решения в автомодельное показано отсутствие перекачки вещества между основными и сателлитными каплями.

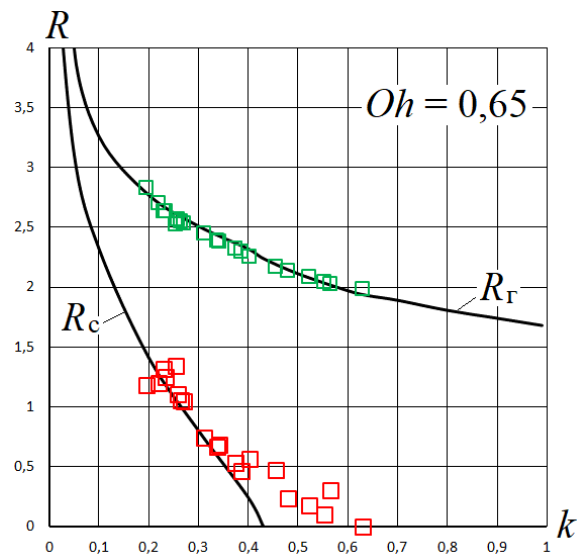


Рис. 4. Сравнение теоретических (линии) и экспериментально измеренных зависимостей размеров основных R_r и сателлитных R_c капель от безразмерного волнового числа k для $Oh = 0,65$.

Экспериментальная проверка полученных закономерностей проводилась со струями вакуумного масла VM1-C как в атмосфере, так и в вакуумной камере при давлении $\sim 10^{-2}$ торр. Теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными (рис. 4) и показывают неприменимость невязкой теории для моделирования ВКРС вязких жидкостей. В экспериментах обнаружено появление микросателлитов.

Микросателлиты образуются в результате развития гидродинамических неустойчивостей в области тонкого перешейка, соединяющего зародыши капель. Экспериментальные исследования и численное решение (рис. 5) гидродинамической системы уравнений показали, что неустойчивость течения жидкости в перешейке приводит к образованию периодической структуры волн – зародышей микросателлитных капель. Известно, что система автомодельных уравнений, описывающих процесс утончения вязкого перешейка, не имеет периодических решений [5]. Проведенный анализ показал, что этот результат определяется использованием при выводе автомодельного уравнения предпо-

ложения о пренебрежимой малости величины $\partial_{xx}h$ по сравнению с другими членами динамического уравнения.

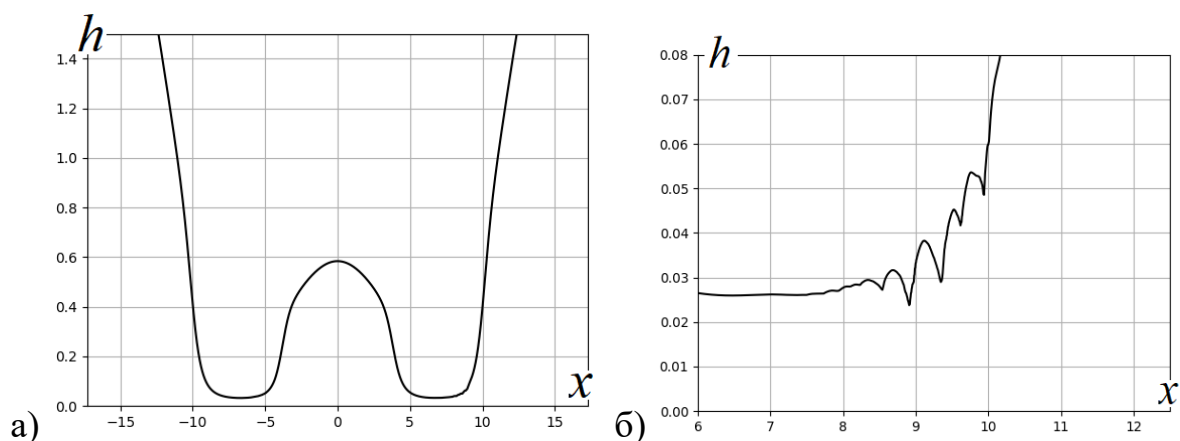


Рис. 5. Форма струи в разных масштабах при формировании зародышей микросателлитов в перешейке, соединяющем основную и сателлитную капли; $k = 0,2$, $On = 0,75$.

На основе общих физических закономерностей, анализа численного решения, а также сравнения относительной величины членов динамического уравнения в области формирования зародышей микросателлитов, в работе было предложено следующее модельное уравнение – редукция исходного динамического уравнения для вязкой струи: $\partial_x(\partial_{xx}h - 1/h) + 3On\partial_{xx}u = 0$. При выводе этого соотношения малым по сравнению с величиной $\partial_{xx}u$ считался член $2\partial_x h \partial_x u / h$. Применимость этого модельного условия объясняется тем, что образование структуры волн происходит в малой окрестности экстремума скорости, в которой величина $\partial_x u$ мала. После проведения замены переменных $x' = x - ut$, с учетом уравнения неразрывности, уравнение образования зародышей микросателлитов принимает вид:

$$6On \cdot \partial_t h - h \partial_{xx} h + 1 - h/h_0 = 0,$$

где h_0 – радиус струи в момент начала формирования зародышей микросателлитов.

В диссертации проведено аналитическое и численное исследование решений предложенного уравнения, имеющего два стационарных решения: константу h_0 и периодическое решение нелинейного дифференциального уравнения $h\partial_{xx}h + h/h_0 = 1$ (изображено на рис. 6а). Последнее реализуется в результате потери устойчивости постоянного решения, связанного с расширением экстремума в поле величины второй производной скорости струи по координате.

Аналитическое исследование отрыва зародыша микросателлита от струи проводилось в предположении пренебрежимой малости величины h/h_0 по срав-

нению с другими членами уравнения образования зародышей микросателлитов. Получившееся дифференциальное уравнение $6On\partial_t h = h\partial_{xx}h - 1$ является нелинейным уравнением теплопроводности и имеет автомодельное решение:

$$h = h(0) - \frac{1}{6On}t + \frac{1}{\tau - t/(6On)} \cdot \frac{(x^* - x)^2}{2},$$

где $\tau = 6h(0)On$, а x^* – координата точки разрыва струи. Полученное выражение локально описывает процесс разрыва струи (рис. 6б). Таким образом, процесс отрыва микросателлита имеет описание, схожее с описанием явления локализации тепла [6].

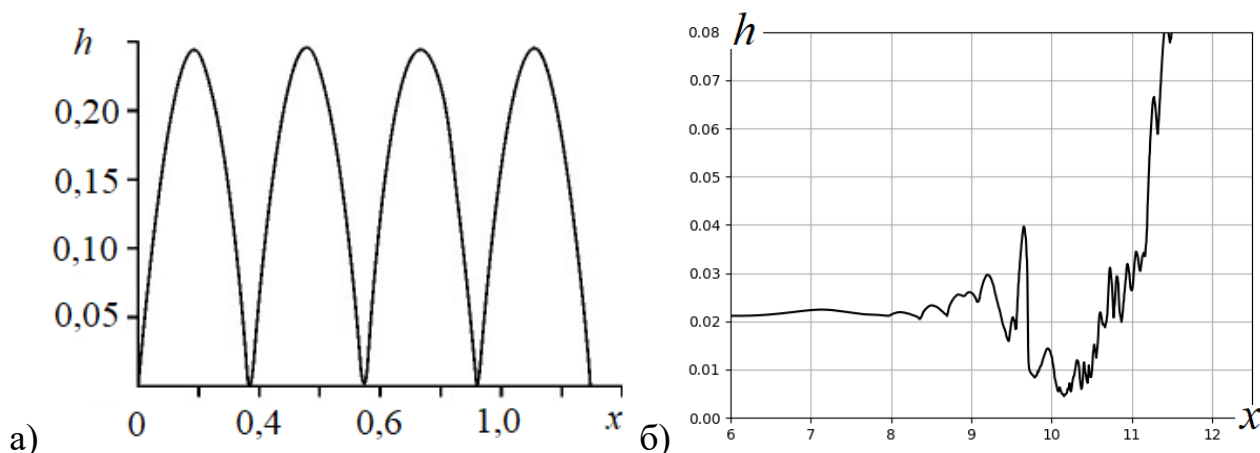


Рис. 6. а) Решение уравнения $h\partial_{xx}h + h/h_0 = 1$ при $h_0 = 0,05$, $h(0) = 0,0025$, $\partial_x h(0) = 1$. б) Численный расчет отрыва зародыша микросателлита от струи (продолжение расчета на рис. 5).

В третьей главе диссертации проведено исследование теплообмена в дисперсном потоке бескаркасных систем отвода низкопотенциального тепла в космосе. Предложена физическая модель остывания капель. Показано, что для проведения теплового расчёта КХИ приемлемую точность обеспечивает использование модели геометрической оптики. Проведена оценка градиента поля температуры в капле, показано, что частицы с высокой точностью могут считаться изотермическими (разность температур по объему не превышает 0,5 К).

В низкопотенциальном КХИ тепло наилучшим образом отводит тонкий структурированный капельный поток с оптической толщиной, близкой к единице. Такой поток состоит из нескольких элементов структуры – параллельных тонких капельных слоёв (рис. 7), расстояние между которыми значительно превышает их толщину. Капли считаются одинаковыми и равномерно распределенными по слоям. Длина и ширина элементов структуры значительно превышает толщину капельной пелены. Частицы слоя находятся в одинаковых усло-

виях переоблучения с капельным потоком. С учётом взаимного переоблучения капель, уравнение их остывания имеет вид:

$$mc \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + u \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) = -4\pi r^2 \varepsilon(r, T_i) \sigma_B T_i^4(t, x) + Q_{i\Sigma}(t, x, T_i) + P_{\odot i}(t, x, T_i),$$

где t и x – время и координата, m , u – масса и скорость капель, T_i – поле температуры в i -м капельном слое, c – плотность вещества, σ_B – постоянная Стефана-Больцмана, $P_{\odot i}$ – мощность внешнего излучения, ε – интегральная степень черноты капли. Слагаемое $Q_{i\Sigma}$ характеризует радиационное взаимодействие капли с другими частицами потока.

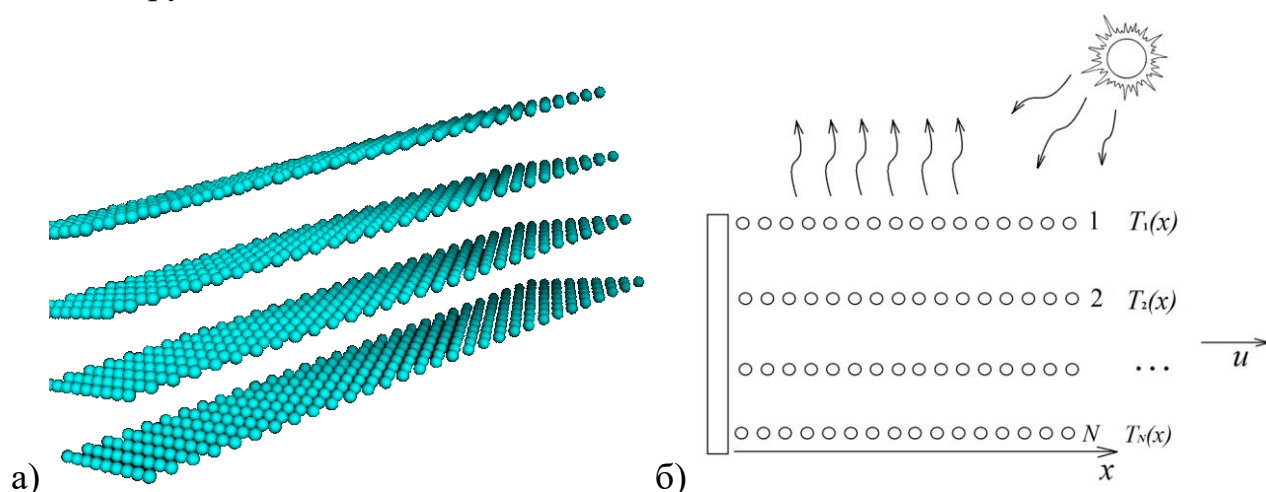


Рис. 7. а) Структурированный капельный поток, состоящий из четырех капельных слоев. б) Остывание структурированного капельного потока.

Расчет кинетических коэффициентов переноса излучения проводился с помощью решения кинетического уравнения для фотонов с введением функции распределения углового коэффициента переоблучения между пробной каплей и элементом капельного слоя. Численный расчет функции распределения проводился пиксельным методом, применимым при малых расстояниях между каплями и капельной плоскостью (менее ста радиусов капли, $r \sim 100$ мкм). Рассчитывалась центральная проекция капельного потока на сферу с центром, совпадающим с центром исследуемой капли (рис. 8а). При больших расстояниях между слоями использовался сеточный метод расчёта переоблучения – на пространство координат накладывалась сетка, плотность функции распределения рассчитывалась в окрестности её узлов и аппроксимировалась по пространству (рис. 8б). Кроме того, был предложен ряд аналитических моделей функции распределения, использовавшихся для тестовых расчетов, проверки результатов численного моделирования и анализа закономерностей переоблучения капель. С помощью функции распределения коэффициента переоблучения был проанализирован вклад в процесс радиационного остывания капельной пелены многократных отражений излучения на каплях.

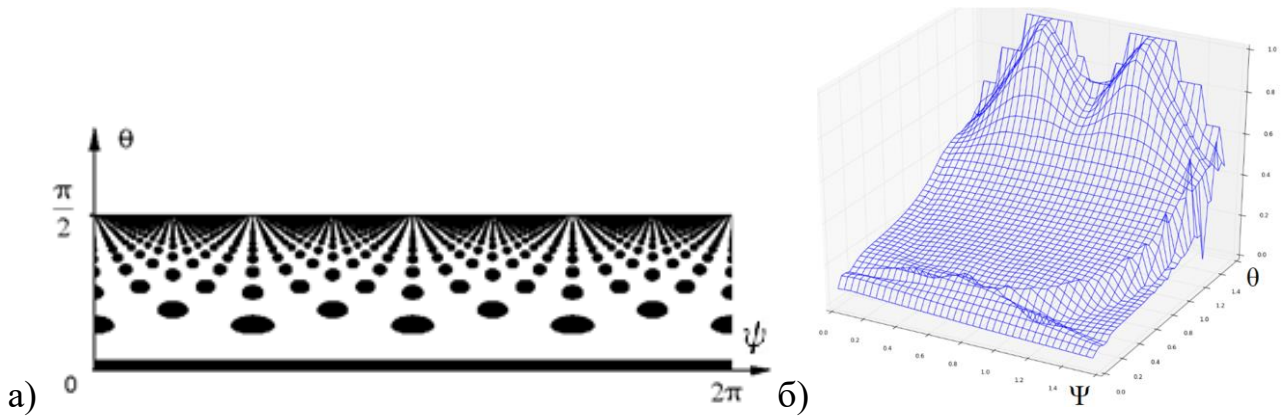


Рис. 8. Функция плотности распределения коэффициента излучения капельного слоя в полярных координатах, рассчитанная а) пиксельным и б) сеточным методами.

Величина $Q_{i\Sigma}$, описывающая переоблучение в потоке, записывается в виде:

$$Q_{i\Sigma}(t, x) = 4\pi r^2 \varepsilon_q \sigma_B \sum_{j=1}^N \int_{-x}^{L-x} f_{i,j}(p) T_i^4(t, x+p) dp,$$

где L – длина пролёта капель в пелене, $f_{i,j}$ – свертка плотности функции распределения коэффициента излучения между капельными слоями с номерами i и j . Физический смысл интеграла – суммирование энергии переоблучения всех капель пелены с исследуемой каплей. С учетом последнего соотношения, учитывая, что расстояние между капельными слоями существенно больше их толщины, уравнение радиационного остывания принимает вид:

$$\frac{1}{\alpha u} \frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_i}{\partial x} = -T_i^4 + \varepsilon_q \sum_{j=1}^N \int_{-x}^{L-x} f_{i,j}(p) T_i^4(t, x+p) dp + P_{\odot i} / (mcu),$$

где $\alpha = 3\sigma\varepsilon_q/(rcup)$. Приближенное решение этой системы интегродифференциальных уравнений, описывающих остывание капли при наличии внешнего излучения, проводилось методами: асимптотических разложений, последовательных приближений, а также вариационным методом Боголюбова. Предложенные приближенные зависимости позволяют рассчитать поле температуры в натурном КХИ с погрешностью, не превышающей нескольких градусов.

Разработан программно-вычислительный комплекс для совместного автоматизированного решения задач переноса излучения и радиационного остывания частиц. С его помощью были решены задачи: проектирования изотермической (имеющей нулевой градиент в направлении, нормальном вектору скорости) структуры потока КХИ, определения максимальной мощности капельного излучателя, поля температуры в КХИ с произвольной оптической толщиной (рис. 9а) и проектирования капельного потока с заданными свойствами (рис. 9б). Предложена модель совместной работы КХИ и энергетической установки

космического аппарата, позволяющая оптимизировать характеристики КХИ (размер, количество капельных слоёв, радиус капель и т.д.).

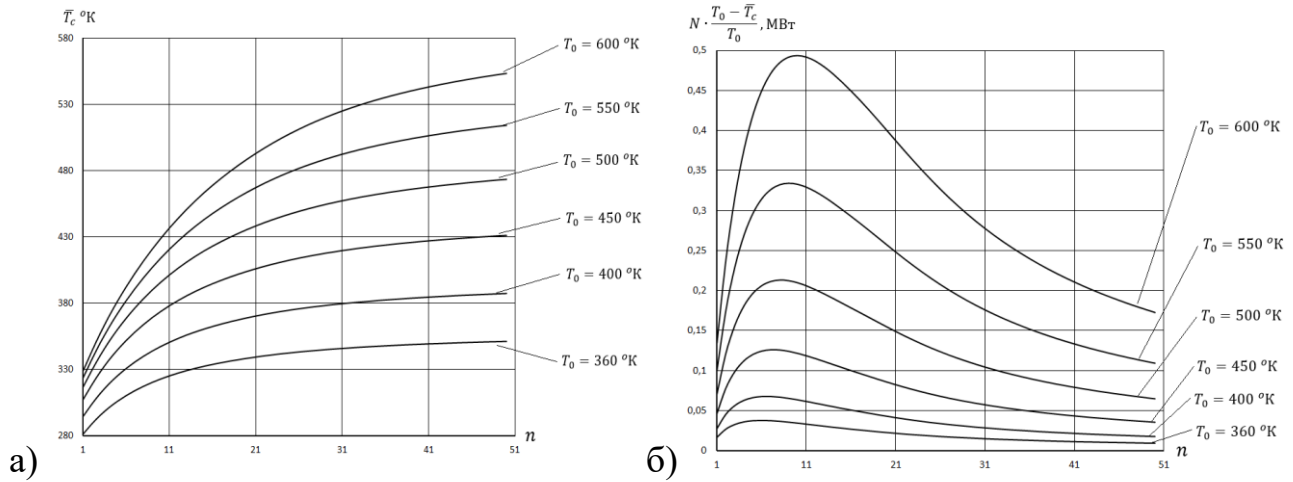


Рис. 9. а) Зависимость конечной среднемассовой температуры капель T_c от количества капельных слоёв n при различной начальной температуре T_0 . б) Зависимость произведения тепловой мощности КХИ N и КПД идеальной тепловой машины, работающей на перепаде температур КХИ $(T_0 - T_c)/T_0$, от n при различных T_0 .

В четвертой главе диссертации проведено исследование процесса установления профиля температуры в дисперсном потоке КХИ произвольной оптической толщины. С помощью метода функции Ляпунова показано, что в остывающем потоке могут длительное время существовать возмущения поля температуры. Для исследования решения системы интегро-дифференциальных уравнений радиационного остывания дисперсного потока вводилась величина запаздывания $\Delta x_{i,j}$, определяемая соотношением:

$$\varphi_{i,j} T_i^4(x - \Delta x_{i,j}(t, x)) = \int_{-x}^{L-x} f_{i,j}(p) T_i^4(t, x + p) dp, \text{ где } \varphi_{i,j} = \int_0^L f_{i,j}(p) dp.$$

На семействе характеристик $q = ut - x = const$ уравнение остывания имеет вид системы с запаздыванием: $\frac{dT_i}{dx} = -\alpha T_i^4 + \varepsilon_{\text{ч}} \alpha \sum_{j=1}^N \varphi_{i,j} T_i^4(x - \Delta x_{i,j}(t, x)) + \alpha P_{\text{св}} / (mcu)$.

Аналитически задача установления решалась с использованием модели капельного потока, состоящего из ядра и периферии. Примером такого потока является оптически толстый цилиндрический поток капель (рис. 10а). Проводилась замена переменных: $\xi = (1 + 3\alpha T_0^3 x)^{-1/12}$, $T_i(\xi) = T_0 \xi^4 \tau_i(\xi)$. В новых переменных идеализированная задача остывания дисперсного потока (без учета внешнего излучения и дальних радиационных взаимодействий) описывается диссипативной системой динамических уравнений: $\frac{1}{4} \xi \frac{d\tau_i}{d\xi} = \tau_i^4 - \tau_i - \varepsilon_{\text{ч}} \sum_{j=1}^N \varphi_{i,j} \tau_j^4$.

Аналитически и численно изучено влияние на фазовую траекторию динамической системы внешнего (например, солнечного) излучения, а также наличия в системе дальних радиационных взаимодействий (рис. 10б). Показано, что под действием этих факторов положение равновесия диссипативной системы уравнений для расчета профиля температуры начинает двигаться. При этом возникают колебания фазовой траектории динамической системы. Амплитуда колебаний рассчитывалась аналитически и численно. Результаты численных расчетов количественно и качественно согласуются с аналитическими.

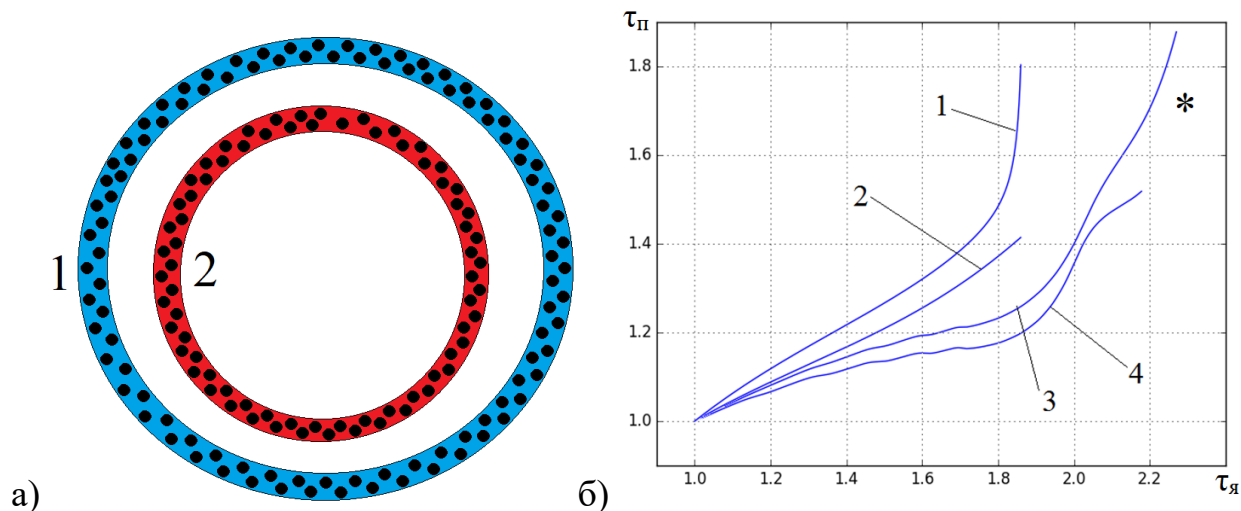


Рис. 10. а) Модель капельного потока, состоящего из периферии (1) и ядра (2). б) Влияние различных факторов на установление профиля температуры дисперсного потока: 1 – учтено солнечное излучение; 2 – без учёта солнечного излучения и дальних радиационных взаимодействий; 3 – с учетом солнечного излучения и дальних радиационных взаимодействий; 4 – учтены дальние радиационные взаимодействия; * – положение равновесия идеализированной задачи.

Проведён анализ устойчивости процесса отвода тепла от КХИ по отношению к геометрической деформации капельного потока, вызванной неидеальностью процесса генерации капель; деформаций, связанных с наличием пространственного электрического заряда, и т.д. Выявлены условия, при которых процесс установления профиля температуры оказывается неустойчивым.

Заключение

Основные результаты работы 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 капельного потока.

Литература

1. Демянко Ю.Г., Конюхов Г.В., Коротеев А.С., Кузьмин Е.П., Павельев А.А. Ядерные ракетные двигатели. – М.: ООО «Норма-Информ», 2001. – 414 с.
2. Dombrovsky L.A. Radiation Heat Transfer in Disperse Systems. – New York: Begell House, 1996. – 690 p.
3. Siegel R. Separation of variables solution for nonlinear radiative cooling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1987. V 4. Pp. 959–965.
4. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. Pp. 1–79.
5. Eggers J. Stability of a viscous pinching thread // Phys. Fluids. 2012. V.24. DOI: 10.1063/1.4732545.
6. Галактионов В.А., Дородницын В.А., Еленин Г.Г., Курдюмов С.П., Самарский А.А. Квазилинейное уравнение теплопроводности с источником: обострение, локализация, симметрия, точные решения, асимптотики, структуры // Итоги науки и техн. Сер. Современ. пробл. мат. Нов. достиж. 1986. №28. С. 95–205.

Работы, опубликованные по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Сафронов А.А. Расчёт максимальной тепловой мощности космического капельного холодильника-излучателя // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. Вып. 65.
2. 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.
3. 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.
4. *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.
5. *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 обработок и нерешённые задачи // Известия Академии Наук. Энергетика. 2015. №4. С. 130–142.
6. *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.

***Работы, опубликованные по теме диссертации в изданиях,
индексируемых в Web of Science и Scopus***

1. *Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И.* Влияние структуры капельной пелены на мощность бескаркасных 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 бескаркасных 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.

Сафронов Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАПЕЛЬНОГО ПО-
ТОКА И РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В БЕСКАРКАСНЫХ
СИСТЕМАХ ОТВОДА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО
ТЕПЛА В КОСМОСЕ**

Автореферат

Подписано в печать 30.01.2019
Формат 60×84/16. Объем 1 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 43
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
125438, г. Москва, ул. Онежская, 8
