

На правах рукописи



БУХАРОВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ
КАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ С МИНИМАЛЬНЫМ РАЗБРОСОМ ПО
СКОРОСТИ И РАЗМЕРАМ КАПЕЛЬ**

Специальность 01.04 .14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на кафедре низких температур.

Официальные
оппоненты: **Григорьев Александр Иванович**,
доктор физико-математических, профессор, профессор
учебно-научной лаборатории математического
моделирования физических процессов ФГБОУ ВО
«Ярославский государственный университет им. П.Г.
Демидова».

Афанасьев Валерий Никанорович,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Теплофизика» ФГБОУ ВО «Московский государствен-
ный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)».

Конюхов Георгий Владимирович
доктор технических наук, профессор, ведущий научный
сотрудник Национального исследовательского центра
"Курчатовский институт".

Ведущая
организация: ФГБУН Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук

Защита состоится 16 декабря 2016 г. в 10:00 на заседании диссертационного
совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250,
г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, корп. Т, кафедра Инженерной
теплофизики им. В.А. Кириллина, ауд. Т-209.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах) с подписями, заверенные
печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул.
Красноказарменная, д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
кандидат технических наук

А.К. Ястребов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основной тенденцией современного развития дисперсных технологий является переход от дисперсных систем с большим разбросом по параметрам к монодисперсным системам, состоящим из потоков сферических частиц различного фазового состояния с малым разбросом по размерам и скорости.

В настоящее время проблемами получения и практического использования монодисперсных потоков занимаются многие ведущие исследовательские центры как отечественные, так и зарубежные. В России исследования проводятся в Ракетно-космической корпорации «Энергия», ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», МАИ, МЭИ, МГТУ, ИТЭФ, С-ПбГПУ. Среди зарубежных научных центров можно отметить: Институт ядерной физики в г. Юлих (FZJ, Германия), университет в г. Упсала (Швеция), Вашингтонский университет, НАСА, «Боинг» (Boeing), «Макдоннелл Дуглас Аэроспейс» (McDonnell Douglas Aerospace) и «Грумман» (Grumman).

Большой вклад в изучение монодисперсных потоков внесли работы сотрудников МЭИ, где, начиная с 80-х годов XX века, под руководством чл.-корр. РАН В.А. Григорьева и к.х.н. В.В. Шишова были начаты соответствующие исследования.

Применительно к современному этапу развития энергетики наиболее интересным и перспективным является использование монодисперсных потоков: для решения проблем теплоотвода от космических аппаратов и для создания технологий, основанных на взаимодействии вещества в виде криогенных корпускулярных мишеней с высокоэнергетичными пучками.

Благодаря своим уникальным свойствам, криогенные корпускулярные мишени перспективны при исследовании фундаментальных проблем ядерной физики. Мишени такого типа уже являются элементом следующих научных программ: «WASA CELSIUS» (Швеция); программа исследований на протонном ускорителе ИТЭФ и ряд других. В ближайшее время создание криогенных корпускулярных мишеней планируются на ускорителях в

г. Юлих (Германия) и в г. Ланьчжоу (Китай). Кроме этого, криогенная корпускулярная мишень рассматривается как наиболее важный элемент будущих экспериментов на новом европейском ускорителе ФАИР (Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR) в Дармштадте (Германия). Ожидается, что эксперименты будут проводиться с высокоэнергетичными пучками энергией до 15 ГэВ и станут дополнением к исследованиям на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе.

Использование криогенной корпускулярной мишени в качестве элемента лазерных технологий позволит: изучать вещество в экстремальном состоянии; создавать компактные ускорители заряженных частиц (электронов, протонов и тяжёлых ионов); даст возможность производить изотопы и разрабатывать новые методы в ядерной медицине; создавать новые источники излучения для микро и наноэлектроники.

Одной из важнейших задач в области космических систем и технологий является создание новых перспективных систем теплоотвода от космических аппаратов. С точки зрения максимального теплоотвода особый интерес представляют радиационные капельные холодильники излучатели – КХИ. В излучателях такого типа используются монодисперсные капельные потоки из вязких жидкостей. Капли выбрасываются в космическое пространство в виде регулярной структуры (капельной пелены), излучают тепло, охлаждаются и собираются в сборнике капель. Особенно эффективно использование КХИ в тех случаях, когда мощность теплоотвода от космического аппарата превышает 100 кВт , а при мощностях больших 10 МВт конкуренцию КХИ не может составить ни одна из существующих систем теплоотвода.

Наиболее важная теплофизическая проблема, влияющая на получение стабильных монодисперсных капельных потоков с минимальным разбросом по размерам и скорости — проблема капиллярного распада.

Теоретической основой капиллярного распада является теория Рэлея-Вебера. Однако к настоящему моменту имеется ряд экспериментальных результатов, которые не могут быть объяснены в рамках этой теории. Распад

тонких криогенных струй и вязких струй теплоносителя происходит не так, как это следует из теории Рэлея-Вебера, что свидетельствует о наличии дополнительных явлений, не учитываемых данной теорией.

Необходимо отметить, что экспериментальных работ по исследованию капиллярного распада тонких криогенных и вязких струй крайне мало. Вызвано это следующими обстоятельствами, затрудняющими экспериментальные исследования: малым размером капель (от нескольких микрон до одного миллиметра); большими скоростями (до 100 м/с); высоким вакуумом; наличием низких температур (от 16 К до 90 К) при исследовании криогенных корпускулярных мишеней и высоких температур (до 400 К) при исследовании капельных холодильников излучателей.

Мало исследованы и следующие теплофизические проблемы, влияющие на получение стабильных монодисперсных капельных потоков из криогенных и вязких жидкостей: охлаждение и замерзание капель; ускорение капель газовым потоком; получение капельной пелены с максимальным тепловым излучением.

Кроме того, к настоящему времени не отработаны конструкции генераторов монодисперсных капель — главного элемента, как установок по получению криогенных корпускулярных мишеней, так и капельных холодильников излучателей.

Таким образом, несмотря на большую перспективность и накопленный экспериментальный и теоретический материал, создание установок по получению криогенных корпускулярных мишеней и высокоэффективных капельных теплообменников для отвода тепла от космических аппаратов всё ещё находится на начальной стадии. В силу этого, подробное изучение теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных капельных потоков из криогенных и вязких жидкостей является весьма актуальным, обоснованным и необходимым.

Целью работы является установление механизмов и физических закономерностей процессов получения стабильных капельных потоков с мини-

мальным разбросом по скорости и размерам капель применительно к следующим задачам: созданию нового вида космических теплообменников и созданию установок по получению криогенных корпускулярных мишеней.

Для достижения цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработка и создание на основе анализа изображений, получаемых от нескольких цифровых камер, методологии и программного обеспечения, необходимых для автоматизированной прецизионной диагностики характеристик вынужденного капиллярного распада струй (ВКРС) и капельных потоков.

2. Разработка и создание автоматизированной экспериментальной установки для комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем получения монодисперсных капель и твёрдых монодисперсных гранул (мишеней) из криогенных жидкостей. Разработка и создание генератора монодисперсных капель, стабильно работающего при температурах от 16 K до 90 K, тестирование различных технологий изготовления выходных насадок.

3. Исследование, применительно к установкам по получению криогенных корпускулярных мишеней, следующих теплофизических и конструкционных проблем: влияния на устойчивое получение жидких криогенных струй конструкции схемы ожижения и чистоты рабочего газа; влияния на характеристики твёрдых монодисперсных гранул (мишеней) режимов получения криогенных струй и параметров капиллярного распада.

4. Разработка и создание автоматизированной экспериментальной установки для комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем получения из вязких жидкостей стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель. Разработка и создание генератора монодисперсных капель, стабильно работающего при температурах от 300 K до 400 K, тестирование различных технологий изготовления выходных насадок.

5. Исследование, применительно к капельным холодильникам излучателям, следующих теплофизических и конструкционных проблем: влияния вязкости рабочей жидкости на характеристики режима перехода от капельного к струйному; влияния вязкости на рост амплитуды возмущения и оптимальную частоту распада; влияния давления окружающей среды на поперечную и продольную устойчивость капельных потоков.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведены систематические исследования теплофизических и конструкционных проблем создания нового класса космических теплообменников – капельных холодильников излучателей.

2. Для широкого диапазона изменения динамической вязкости рабочей жидкости ($0,004 \text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$) экспериментально исследовано влияние вязкости на основные характеристики капиллярного распада струй: на рост амплитуды возмущения и на оптимальную частоту распада:

– установлено, что при большой вязкости жидкости $\eta > 0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$ скорость роста волны возмущения замедляется. Чем больше вязкость, тем больше волна возмущения становится нелинейной, причём начало нелинейных эффектов приближается к месту истечения струи. Рост волны возмущения перестаёт быть монотонным и не может быть описан в рамках линейной теории Рэлея-Вебера;

– впервые обнаружено, что при вязкости $\eta > 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($Oh^{-1} < 20$) и при малых скоростях ($Re < 20$) влияние вязкости и скорости жидкости на величину оптимального волнового числа оказывается более существенным, чем предсказывает теория. В этой области отличие между экспериментально измеренным оптимальным волновым числом и числом, рассчитанным по теории Рэлея-Вебера, может достигать сорока процентов.

3. Экспериментально исследовано влияние давления окружающей среды на устойчивость капельных потоков, и определены значения минимальных относительных среднеквадратичных начальных отклонений поперечной и продольной скоростей капель.

4. Для широкого диапазона изменения динамической вязкости рабочей жидкости ($0,004 \text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$) экспериментально исследовано, применительно к нестационарным режимам КХИ (начальный пуск и переход с одной орбиты на другую), влияние вязкости рабочей жидкости на переход струйного режима в капельный и переход капельного режима в струйный:

– установлено, что общим для насадок с разными выходными диаметрами является превышение давления прямого перехода (от капельного режима к струйному) над давлением обратного перехода (от струйного режима к капельному);

– впервые обнаружено, что в области больших вязкостей $0,02 \text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и малых скоростей струй ($Oh > 1, Re < 2$) границы начала области рэлеевского распада для обоих режимов перехода поразному зависят от числа Вебера.

5. В ходе экспериментов по инъекции жидких струй в среду с низким давлением обнаружен эффект отклонения струи от первоначального вертикального положения:

– эффект впервые зафиксирован для водных струй и для струй из криогенных жидкостей. Эксперименты показали, что направление загиба выбирается струей случайным образом. Однако выбранное направление при малой величине загиба со временем не меняется. При больших углах загиба наблюдается периодическое скачкообразное изменение направления, а также колебания нераспавшейся части струи;

– впервые экспериментально установлено, что эффект начинает проявляться при давлении окружающей среды в четыре раза меньше давления, соответствующего давлению насыщенных паров жидкости при данной температуре.

6. Проведены систематические исследования теплофизических и конструктивных проблем создания нового класса перспективных технологических установок по получению криогенных корпускулярных мишеней.

7. Впервые экспериментально исследованы режимы получения тонких

криогенных струй водорода, азота и аргона: режим начального получения струи, режим неустойчивости струи и режим устойчивой криогенной струи:

- обнаружены новые рэлеевские режимы неустойчивости струй, и определены параметры области их существования;

- определены параметры области устойчивого распада криогенных струй.

8. Исследовано влияние примесей, растворённых в сжиженном рабочем газе, на время работы установок по получению криогенных корпускулярных мишеней:

- впервые для выходных насадок с диаметром меньше 30 мкм экспериментально обнаружена связь между суммарным количеством твёрдых примесей, растворённых в сжиженном рабочем газе, и временем работы.

9. Проведены систематические исследования капиллярного распада жидких криогенных струй:

- впервые получен монодисперсный распад тонких струй водорода, азота и аргона (диаметр от 5 мкм до 30 мкм), и определены параметры области монодисперсного распада;

- впервые экспериментально установлено, что нижняя граница начала области рэлеевского распада для криогенных струй из водорода, азота и аргона смещается в область меньших скоростей и диаметров;

- впервые для струй азота и водорода с диаметром меньше 30 мкм экспериментально обнаружена зависимость между значением оптимального волнового числа k_m и диаметром струи D_j . Это означает, что классическая теория Рэлея для распада тонких струй из криогенных жидкостей с диаметром меньше 30 мкм не применима.

10. Проведены экспериментальные исследования теплофизических процессов устойчивого прохождения каплями шлюзов и получения твёрдых гранул (мишеней):

- на основании сравнения экспериментальных результатов по прохождению шлюзов разной длины с результатами расчётов получена эмпириче-

ская оценка температуры переохлаждения капель водорода;

– получены высокоскоростные монодисперсные потоки твёрдых гранул водорода, и для таких потоков впервые исследована функция распределения гранул по углу вылета из шлюза и вид распределения гранул по скорости. Установлено, что распределение гранул по углу вылета и по скорости соответствуют нормальному распределению, и определены значения среднеквадратичного отклонения капель по углу вылета и относительное среднеквадратичное отклонение капель по скорости.

Методы исследования, достоверность и обоснованность полученных результатов. Основным методологическим подходом, реализованным в диссертационной работе, является экспериментальное обоснование всех теоретических выводов и расчётных результатов.

При проведении экспериментальных исследований использовались как известные, так и специально разработанные методики. Используемые методики дополняли друг друга и обеспечивали независимый контроль экспериментальных данных.

Основной экспериментальной методикой являлась фиксация и запоминание исследуемых процессов с помощью современных методов высокоскоростной записи изображений. Фиксация процессов происходила в течение короткого времени экспозиции (порядка 0,1 мкс) с помощью двух цифровых видеокамер, расположенных под углом девяносто градусов друг к другу. Обработка записанных изображений осуществлялась в режиме «on line» с помощью специально разработанного программного обеспечения. Использование двух камер, короткого времени экспозиции и специального программного обеспечения позволяло определять параметры исследуемых процессов с высоким пространственным и временным разрешением.

Достоверность полученных основных положений и выводов в диссертации подтверждена: оценкой величины погрешности измерений, постановкой специальных тестовых экспериментов, сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

Научная ценность. Исследование закономерностей распространения колебаний по свободной жидкой поверхности — одна из важных научных проблем, частными случаями которой является изучение закономерностей капиллярного распада струй из вязких и из криогенных жидкостей и получение стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по скорости и размерам капель. Однако экспериментальных работ в этой области относительно мало. Вызвано это сложностью самого объекта исследования: малыми размерами струй и капель (от нескольких микрон до одного миллиметра), их большими скоростями (до 100 м/с), а также значительными финансовыми затратами, необходимыми для создания экспериментального оборудования и проведения экспериментов в широком диапазоне температур от 16 K до 400 K и в условиях высокого вакуума.

В силу этого, научная ценность работы заключается в полученных в ходе выполнения диссертации экспериментальных результатах, которые дадут возможность развить существующие и предложить новые теоретические подходы. Кроме того, использование разработанных оригинальных методик в дальнейших исследованиях капиллярного распада струй и капельных потоков позволит повысить точность и надёжность получаемых результатов.

Практическая ценность заключается в том, что полученные экспериментальные результаты, разработанные расчётные модели и программы, а также полученные в результате обработки экспериментальных данных эмпирические формулы позволяют обоснованно выбирать для радиационных капельных космических теплообменников и установок по получению криогенных корпускулярных мишеней геометрические размеры и оптимальные теплофизические параметры.

Разработанная на основе представленных в диссертации результатов система генерации монодисперсных потоков использовалась в космических испытаниях макета капельного радиационного теплообменника в 2008 году на станции «Мир» (программа «Пелена-2») и в 2014 году на Международной космической станции (программа «Капля-2»). Макет КХИ был создан в

результате совместной работы следующих организаций: ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Ракетно-космическая корпорация «Энергия», МАИ и МЭИ.

Методика автоматизированной прецизионной диагностики характеристик капель и капельных потоков, система генерации, эмпирические формулы, расчётная модель теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней и программа расчёта характеристик основных конструктивных элементов криогенных мишеней — были использованы при создании прототипа криогенной корпускулярной мишени для нового европейского ускорителя ФАИР (FAIR) в г. Дармштадт (Германия).

Созданный прототип является результатом совместной работы Института теоретической и экспериментальной физики, Московского энергетического института и Института ядерной физики г. Юлих (FZJ, Германия).

Результаты работы были использованы при разработке нового метода очистки и дезактивации различных поверхностей¹. В новом методе для очистки поверхностей вместо применяемых сейчас песка и дроби используются ускоренные монодисперсные потоки ледяных гранул. С помощью установок, создающих такие потоки, можно: эффективно удалять маслогрязевые отложения, устаревшие слои краски и ржавчину; проводить дезактивацию радиоактивно загрязнённых поверхностей. Наиболее высок коэффициент дезактивации γ -активности.

По результатам исследований получены: два российских патента, один международный патент и свидетельство о регистрации программного продукта.

На защиту выносятся следующие обладающие научной новизной результаты:

1. Результаты разработанных методик автоматизированной прецизионной диагностики характеристик вынужденного капиллярного распада струй и

¹ Пат. № 2309832 РФ. Установка для очистки поверхности / А.В.Бухаров, А.С.Дмитриев, Е.В.Аметистов; опубл. 10.11.2007. — 5 с.

капельных потоков.

2. Результаты исследования амплитудно-частотных характеристик генераторов монодисперсных капельных потоков и влияние на них высоких и низких температур.
3. Результаты экспериментальных исследований режима перехода от капельного к струйному и режима перехода от струйного к капельному.
4. Результаты экспериментальных исследований влияния вязкости: на рост амплитуды возмущения и на оптимальную частоту распада.
5. Результаты экспериментальных исследований влияния давления окружающей среды на устойчивость капельных потоков.
6. Результаты экспериментальных исследований по инъекции жидких струй в среду с низким давлением.
7. Результаты экспериментальных исследований влияния на стабильность криогенных струй: примесей; температуры и давления внутри генератора капель; температуры и давления внутри камеры, в которую инжeksiруется криогенная струя.
8. Результаты экспериментальных исследований капиллярного распада жидких криогенных струй и процесса получения твёрдых гранул (мишеней).

Личное участие автора. Данная работа выполнена на кафедре низких температур Национального исследовательского университета «МЭИ».

Экспериментальные результаты по исследованию теплофизических и конструкционных проблем нового вида космических теплообменников получены автором на экспериментальных стендах кафедры низких температур МЭИ. Личный вклад автора состоял: в разработке общей концепции и методики проведения экспериментов; в создании стендов и их отдельных систем; в разработке программного обеспечения, необходимого для работы стендов. Во всех работах по созданию стендов и проведению на них экспериментальных исследований автор принимал непосредственное участие либо индивидуально, либо как руководитель с помощью студентов, аспирантов и сотрудников кафедры.

Экспериментальные результаты по исследованию теплофизических и конструкционных проблем криогенных корпускулярных мишеней получены автором на экспериментальных стендах кафедры низких температур МЭИ и на экспериментальной установке, созданной в результате совместной работы Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Московского энергетического института (МЭИ) и Института ядерной физики в г. Юлих (FZJ, Германия). Личный вклад автора состоял: в разработке общей концепции и методики проведения экспериментов; в разработке и создании отдельных систем (системы генерации капель, системы определения характеристик капель и струй, системы автоматизации); в разработке программного обеспечения, необходимого для работы стендов и установки. Во всех работах по созданию стендов, установки и проведению экспериментальных исследований автор принимал непосредственное участие либо индивидуально, либо как руководитель группы, состоящей из студентов, аспирантов и сотрудников кафедры. Эксперименты проводились группой в составе сотрудников МЭИ и ИТЭФ.

Представленные в диссертации экспериментальные методики, результаты обработки экспериментальных данных, обобщения и эмпирические формулы получены автором.

Расчётная модель теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней разработана совместно с д.т.н. А.С. Дмитриевым и к.т.н. А.Ф. Гиневским и представлена в совместных публикациях.

Программное обеспечение, разработанное для предварительной обработки записанных изображений и определения в режиме «on line» параметров капиллярного распада струй и капельных потоков, для расчёта характеристик капель и гранул и для расчёта основных конструктивных элементов криогенной корпускулярной мишени создано под руководством автора диссертации совместно со следующими студентами и сотрудниками кафедры: А. Ю. Бурлаковой, А.В. Чемодановым и С.И. Кукановым. Результаты работы представлены в совместных публикациях.

Благодарности. Автор глубоко признателен коллегам и друзьям А.С. Дмитриеву и А.Ф. Гиневскому за обсуждение работы, полезные замечания и за помощь в работе над диссертацией на разных этапах ее выполнения.

Автор благодарен действующим и бывшим сотрудникам МЭИ А.В. Балашову, А.Д. Тимохину, В.П. Огородникову, М.А. Бухаровой, А.А. Семёнову, С.И. Куканову, а также студентам А.Ю. Бурлаковой и А.В. Чемоданову за постоянное внимание к работе, конкретную помощь в создании экспериментального оборудования, программного обеспечения и полезное обсуждение полученных результатов.

Автор выражает признательность коллегам из Института ядерной физики (FZJ, Германия), ИТЭФ и ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» за участие в проведении совместных исследований.

Значительная часть результатов по теме диссертации получены в ходе выполнения исследовательских работ, поддержанных следующими грантами: проект МНТЦ №1966, INTAS 06-100012-8787, РФФИ 07-08-00747а, DFG-РФФИ 08-08-91950-ННИОа, DFG-РФФИ 09-08-91331-ННИОа.

Публикации и апробация работы. Диссертационная работа является итогом научных исследований и разработок автора за период с 1995 года по настоящее время. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Содержание диссертации отражено в 53 печатных работах, в том числе: одной монографии, двух российских патентах, одном международном патенте, свидетельстве о регистрации программного продукта, 19 печатных работах из перечня ВАК и международных систем цитирования Web of Science и Scopus. Материалы работы были апробированы на более чем 45 российских и международных конференциях, включая такие крупные научные мероприятия, как: Шестая Российская Национальная конференция по теплообмену (Россия, Москва – 2014); XXV Международная научная конференция «Дисперсные системы» (Украина, Одесса – 2012); 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012», (Россия, Москва – 2012); Пятая Российская Национальная

конференция по теплообмену (Россия, Москва – 2010); The 11-th Cryogenics 2010 – IIR International Conference (Czech Republic, Prague – 2010); XXIV научная конференция стран СНГ «Дисперсные системы» (Украина, Одесса – 2010); The 7-th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI08) (Lanzhou, China – 2008); XXIII научная конференция стран СНГ «Дисперсные системы» (Украина, Одесса – 2008); IX Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Россия, Москва – 2007); Четвертая Российская Национальная конференция по теплообмену (Россия, Москва – 2006); The Meeting on Magnets and Targets (Sweden, Uppsala – 2005); Hadron 05 - XI International Conference on Hadron Spectroscopy (Brazil, Rio de Janeiro – 2005); XXI научная конференция стран СНГ «Дисперсные системы» (Украина, Одесса – 2004); 6-th International Conference Cryogenics (Czech Republic, Prague – 2000); 5-th International Conference Cryogenics (Czech Republic, Prague – 1998);

Структура и краткое содержание диссертационной работы. Структурно работа состоит из введения, 5-и глав, основных выводов и списка литературы. Работа содержит 390 страниц текста, в том числе: 134 рисунка, 8 таблиц. Библиография насчитывает 286 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы цели и задачи; определена научная новизна и практическая ценность; представлено краткое содержание работы; описаны методы исследования и результаты апробации работы.

В первой главе представлен обзор литературы по вопросам использования и получения стабильных капельных потоков с минимальным разбросом по размерам и скорости. На основании анализа литературы сформулирована цель диссертационной работы и основные задачи для её достижения.

В разделе 1.1 представлен анализ современного состояния монодисперсных технологий. Подчёркнута перспективность использования монодисперсных систем для решения проблем теплоотвода от космических аппаратов и для

создания технологий, основанных на взаимодействии вещества в виде криогенных корпускулярных мишеней с высокоэнергетичными пучками.

В разделе 1.2 и разделе 1.3 дано описание принципа работы, основных характеристик и возможных конструкций установок по получению криогенных корпускулярных мишеней^{2,3} и систем теплоотвода от космических аппаратов – капельных холодильников излучателей.

Сформулированы основные конструкционные и теплофизические проблемы криогенных корпускулярных мишеней и капельных холодильников излучателей. Отмечено, что экспериментальное исследование этих проблем осложнено малым размером капель и гранул (от нескольких микрон до одного миллиметра); большими скоростями (до 100 м/с); высоким вакуумом; наличием низких температур (от 16 K до 90 K) при исследовании криогенных корпускулярных мишеней и высоких температур (до 400 K) при исследовании капельных холодильников излучателей.

Подчёркнуто, что главным конструкционным элементом, как криогенных корпускулярных мишеней, так и капельных холодильников излучателей является генератор монодисперсных капель с системой возбуждения и выходной насадкой. Отмечено, что к настоящему времени ни конструкции генераторов, ни технология производства насадок с большим количеством выходных соосных отверстий так до конца и не отработаны. Мало изученным остаётся и вопрос о влиянии низких (от 16 K до 90 K) и высоких температур (до 400 K) на амплитудно-частотные характеристики генераторов монодисперсных капель.

Подчёркнуто, что основной теплофизической проблемой, влияющей на создание высокоэффективных КХИ и установок по получению криогенных

² Пат. № 2298890 РФ. Способ получения криогенной корпускулярной мишени и устройство для его осуществления / А.В.Бухаров, М. Бюшер, В. П. Чернышев, В.Д. Чернецкий; опубл. 10.05.2007. – 6 с.

³ Пат. WO 2008/125078 А3 Германия, МПК F 25J 1/02, H05H 1/22. Verfahren und Vorrichtung zur Kühlung eines Gases / Boukharov A.(RU), Büscher M. (DE); патентообладатель Forschungszentrum Jülich.; опубл. 02.04.2008. – 23 p.

корпускулярных мишеней, является капиллярный распад. На основе анализа литературы показано, что имеется ряд экспериментальных результатов, которые не могут быть объяснены в рамках существующей теории капиллярного распада Рэлея-Вебера.

Отмечено, что решение проблем невозможно без усовершенствования существующих и развития новых методов измерений характеристик капельных потоков, без проведения дополнительных исследований капиллярного распада жидких струй в широком диапазоне температур (от 16 K до 400 K).

В разделе 1.4 сформулирована цель диссертационной работы и основные задачи для её достижения.

Вторая глава посвящена анализу существующих методик измерения характеристик капиллярного распада струй и капельных потоков. Применительно к задачам, поставленным в диссертации, обоснована необходимость разработки новых измерительных методик.

В разделе 2.1 на основании анализа имеющейся литературы показано, что на момент начала исследований, представленных в диссертации, не существовало надёжных экспериментальных методик одновременного измерения основных характеристик вынужденного капиллярного распада струй (ВКРС) и характеристик, образующихся в результате распада струй капельных потоков.

В разделе 2.2 представлено описание специально разработанной для решения экспериментальных задач, поставленных в диссертации, методологии автоматизированной прецизионной диагностики характеристик ВКРС и капельных потоков. Дано подробное описание методологии, рабочих алгоритмов и её аппаратное оформление.

В разделе 2.3 представлено подробное описание программного обеспечения, разработанного для предварительной обработки записанных изображений и последующего определения параметров ВКРС и монодисперсных капель⁴.

⁴ Свид. о рег. № 2015619172 Российская Федерация. Программа для определения характеристик жидких струй и капель «JET-1»/А.В.Бухаров, С.И. Куканов; опубли. 25.08.2015.

В разделе 2.4 представлены результаты тестирования программного обеспечения и методологии определения характеристик ВКРС и капельных потоков. С помощью специально поставленных экспериментов подтверждена работоспособность и эффективность методологии, и определена её погрешность. Для струй длиной в несколько миллиметров относительная погрешность определения характеристик ВКРС не превосходит 0,5%.

В разделе 2.5 сформулированы основные выводы по второй главе диссертации. Особо подчёркнуто, что разработанные оригинальные методики и программное обеспечение существенным образом расширяют возможности экспериментальных исследований струй и капельных потоков. Использование разработанных методик в дальнейших исследованиях капельных потоков позволит повысить точность и надёжность экспериментальных результатов.

Третья глава посвящена результатам комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных капельных потоков применительно к задаче создания нового вида космических теплообменников – капельных холодильников излучателей (КХИ).

В разделе 3.1 дано подробное описание экспериментальной установки - макета КХИ и отдельных её систем: вакуумной, системы подачи теплоносителя, системы генерации монодисперсных капель, измерительной системы и автоматизированной системы управления и контроля. Установка создана на кафедре низких температур МЭИ и предназначена для исследования проблем получения стабильных капельных потоков из вязких жидкостей.

В разделе особое внимание уделено специально разработанному генератору монодисперсных капель, в котором для передачи механических колебаний от системы возбуждения на рабочую жидкость используется мембрана. Отмечено, что основным достоинством генератора является одинаковость амплитуды давления в различных точках насадки. Представлены результаты экспериментов по определению амплитудно-частотной характеристики генератора и влияния на неё высоких температур. Установлено, что при изменении температуры от 300 K до 400 K амплитуда начального возмуще-

ния δ_0 возрастает на 10%. Подчёркнуто, что пренебрежение влиянием на величину начальной амплитуды частоты возбуждения и температуры может привести к получению некорректных физических результатов.

На основании анализа имеющихся технологических возможностей экспериментально установлено, что для получения капельных потоков большой плотности наиболее подходит технология изготовления насадок с помощью электроэрозии с предварительным выдавливанием. Отмечено, что основными достоинствами этой технологии являются высокое качество каналов истечения и их хорошая соосность. Впервые с помощью разработанного генератора с насадкой, изготовленной по технологии электроэрозии, получены потоки из 208 струй диаметром $D_j = 200$ мкм с угловым отклонением осей струй, не превышающим $0,0005$ рад.

В разделе 3.2 отмечено, что у КХИ имеется ряд технических проблем, связанных со спецификой движения космических аппаратов в условиях вакуума и отсутствия сил тяжести. Эксперименты на космической станции «Мир» показали, что в нестационарных режимах (начальный пуск и переход с одной орбиты на другую) возможен как переход струйного режима в капельный (обратный режим перехода), так и переход капельного режима в струйный (прямой режим перехода). Закономерности, влияющие на смену одного режима другим, мало исследованы и требуют дополнительного изучения.

В разделе представлено: описание экспериментальной методики и полученных с её помощью данных по влиянию на смену одного режима другим: температуры рабочей жидкости, вязкости жидкости, скорости истечения и выходных диаметров сопел насадки. Для диапазона изменения динамической вязкости η от $0,004$ Па·с до $0,3$ Па·с получены эмпирические формулы для определения границ переходных режимов;

$$\text{для прямого перехода: } We/We_{кр} = 1 + 0,6(Oh - 0,65)^{1,6},$$

$$\text{для обратного перехода: } We/We_{кр} = 1 + 0,34(Oh - 0,65)^{1,6},$$

где: We – число Вебера, $We_{кр} = 4$ соответствует началу области рэлеев-

ского распада, Oh – число Онезорге.

В разделе 3.3 представлены методики и данные экспериментальных исследований по влиянию вязкости жидкости на рост амплитуды начального возмущения и на оптимальную частоту распада.

В начале раздела отмечено, что используемая в настоящее время для описания капиллярного распада вязких жидкостей теория Рэлея-Вебера основана на независимой эволюции отдельных гармоник, составляющих начальный гармонический сигнал. Подчёркнуто, что для жидкостей с малой вязкостью результаты экспериментов достаточно хорошо согласуются с результатами теории Рэлея-Вебера. Однако при изучении распада жидкостей с большой вязкостью обнаружено существенное отклонение экспериментальных данных от предсказаний теории Рэлея-Вебера, что может служить свидетельством влияния нелинейного взаимодействия гармоник друг на друга, не учитываемых теорией. Отмечено, что количество работ, посвящённых нелинейному взаимодействию гармоник, немногочисленно. Особенно подчёркнуто, что изучение нелинейных эффектов ВКРС важно с научной точки зрения, так как позволит определить: границы применимости теории Рэлея-Вебера для монодисперсного распада струй вязких жидкостей, основные параметры монодисперсного распада и возможный разброс капель по скорости и размерам. С практической точки зрения знание параметров монодисперсного распада необходимо для получения максимального теплоотвода и минимальных потерь теплоносителя капельной пелены.

Для диапазона изменения динамической вязкости η от $0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$ до $0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ экспериментально изучено влияние вязкости жидкости на рост амплитуды возмущения при различных скоростях жидкости, различных частотах возбуждения и различных начальных амплитудах возмущения. Установлено, что при большой вязкости жидкости $\eta > 0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$ рост амплитуды возмущения перестаёт быть монотонным, и не может быть описан в рамках теории Рэлея-Вебера. Возможным объяснением столь существенного влияния вязкости может служить неодинаковое влияние вязкости на гармоники с

разной частотой.

В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных по исследованию влияния вязкости на оптимальную частоту капиллярного распада установлено, что оптимальное волновое число k_m зависит не только от вязкости жидкости, но и от числа Re (то есть от скорости струи V_j). Теория Рэлея-Вебера не учитывает подобную зависимость. Получена эмпирическая формула, связывающая оптимальное волновое число k_m с числами Re и Oh .

$$k_m(Oh^{-1}, Re) = A*(Oh^{-1})^2 + B*(Oh^{-1}) + C,$$

где: коэффициенты A , B и C являются функциями только числа Re .

Подчёркнуто, что экспериментальных исследований влияния вязкости на оптимальную частоту распада крайне мало, а в имеющихся исследованиях указаны не все параметры, при которых проводились эксперименты. Это крайне затрудняет сравнение экспериментальных результатов. Отмечено, что наиболее полно значения экспериментальных параметров, влияющих на оптимальную частоту распада, представлены в работе В.Н. Афанасьева⁵.

Проведено сравнение результатов расчёта оптимального волнового числа k_m по эмпирической формуле с результатами теории Рэлея-Вебера и данными В.Н. Афанасьева. Показано, что при больших скоростях ($Re > 20$) и малых вязкостях $\eta < 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($Oh^{-1} > 10$) результаты расчёта по эмпирической формуле и по формуле, предложенной В.Н. Афанасьевым, хорошо качественно согласуются с выводами теории Рэлея. Однако количественно расчёт по нашей формуле более близок к результатам теории Рэлея-Вебера. Отличие составляет примерно несколько процентов. В области вязкостей $\eta > 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($Oh^{-1} < 20$) и при малых скоростях ($Re < 20$) отличие результатов расчёта оптимального волнового числа k_m по эмпирической формуле от результатов В.Н. Афанасьева достигает пятидесяти процентов, а от расчётов по теории Рэлея-Вебера может достигать сорока процентов.

⁵ Афанасьев В.Н. О некоторых особенностях капельных потоков / В.Н. Афанасьев // Теплофизика высок. темп. – 1998. – Т. 36. – № 1. – С.94–101.

В разделе 3.4 на основе анализа литературы показано, что на устойчивость капельного потока сильное влияние оказывают: внешнее давление; взаимодействие капель друг с другом за счёт испарения и конденсации молекул на их поверхности; начальный разброс скоростей отдельных капель потока.

Отмечено, что в большинстве проведённых расчётно-теоретических исследований нет сопоставления полученных результатов с опытными данными, поскольку экспериментальных работ в этой области из-за сложности проведения экспериментов крайне мало.

Сделан вывод, что развитие и продольной, и поперечной неустойчивости капельного потока происходит из-за того, что у капель, образующихся при монодисперсном распаде струй, имеется очень малый начальный разброс по скорости и размерам (предельная степень монодисперсности). Отмечено, что наиболее вероятной причиной начального разброса является воздействие на струю в месте отрыва капли внешних и внутренних шумов.

В разделе представлено: описание экспериментальной методики и полученных с её помощью данных по влиянию внешнего давления на развитие продольной и поперечной неустойчивости капельного потока.

Экспериментально получено, что минимальные относительные среднеквадратичные поперечное и продольное отклонения имеют следующие значения: $\sigma_{0Y} \approx \sigma_{0X} \approx 1 \cdot 10^{-5}$.

В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных в диапазоне внешних давлений $P_{вк}$ от 0 бар до 1 бар получены эмпирические формулы, связывающие относительные среднеквадратичные поперечное и продольное отклонения по скорости с величиной внешнего давления:

0 бар < $P_{вк}$ < 0,5 бар

$$\sigma(V_y)/V_c = \sigma_{0Y} \cdot \exp(9,55 \cdot P_{вк})$$

$$\sigma(V_x)/V_c = \sigma_{0X} \cdot \exp(12,19 \cdot P_{вк})$$

0,5 бар < $P_{вк}$ < 1 бар

$$\sigma(V_y)/V_c = -2,39 \cdot 10^{-4} + 1,97 \cdot 10^{-3} \cdot P_{вк}$$

$$\sigma(V_x)/V_c = 8,65 \cdot 10^{-5} + 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot P_{вк}$$

Сравнение экспериментальных результатов с результатами работ других авторов показало достаточно хорошее качественное соответствие. Особо отмечено, что полученные эмпирические формулы можно использовать для

оценки предельно достижимых геометрических характеристик капельных потоков: максимально возможной длины потока L_{max} и максимально возможного расстояния между капельными струями в потоке h_{max} .

В разделе 3.5 приведены наиболее важные научные результаты, полученные в ходе исследования теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных капельных потоков из вязких жидкостей.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований капиллярного распада струй в среде низкого давления, а также дано описание расчётной модели теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней.

В разделе 4.1 отмечено, что при инъекции в среду с низким давлением поверхность струи оказывается сильно перегретой по отношению к температуре среды. В результате интенсивного испарения на поверхности струи появляются различного вида неустойчивости, оказывающие сильное влияние на гидродинамику, теплообмен и на геометрию струи. Подчёркнуто, что возникающие на поверхности струи неустойчивости мало изучены как теоретически, так и экспериментально. Дано подробное описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов. Обнаружен эффект отклонения струи от первоначального вертикального положения (эффект «загиба струи»), и дано его подробное описание. Эффект впервые зафиксирован для водных струй и для струй из криогенных жидкостей. В экспериментах изучено влияние на начало эффекта «загиба струи» и его дальнейшее развитие диаметра струи, скорости струи и давления в вакуумной камере $P_{вк}$.

На основании анализа экспериментальных результатов установлено, что среднее значение давления начала эффекта «загиба струи» $P_{вк}^{cp}$ и давление насыщения P_s связаны следующим образом: $P_{вк}^{cp} \approx 0,24 \cdot P_s$ и слабо зависит от диаметра струи и её скорости струи. Среднеквадратичное отклонение всех экспериментальных результатов от среднего значения давления начала эффекта «загиба струи» составило $\pm 18\%$.

Показано, что с уменьшением диаметра струи, скорости струи и давле-

ния в вакуумной камере угол загиба струи увеличивается до тех пор, пока струя остаётся жидкой и распадается на капли. Подчёркнуто, что на основании имеющихся к настоящему моменту экспериментальных данных невозможно однозначно определить природу появления эффекта «загиба струи».

Раздел 4.2 посвящён подробному описанию разработанной на основе имеющихся экспериментальных результатов расчётной модели теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней. В модели учтены следующие физические процессы: капиллярный распад струй жидкого криоагента, теплообмен капель с окружающей средой и получение твёрдых гранул (мишеней), взаимодействие мишеней с газовым потоком в шлюзе.

В разделе 4.3 представлено разработанное на базе расчётной модели программное обеспечение. Задав начальные параметры и размеры основных элементов установки по получению мишеней, можно внутри любого элемента установки определить: температуру и радиус мишени, процент испарения, поток массы с поверхности мишени, величину поперечного отклонения потока мишеней от оси, изменение давления внутри шлюза и скорость мишеней на выходе из него.

В разделе 4.4 представлены результаты расчётов теплофизических характеристик мишеней из водорода в различных камерах установки по получению мишеней для детектора «PANDA» нового европейского ускорителя ФАИР (FAIR) в г. Дармштадт (Германия). Проведено сравнение результатов расчётов по разработанной модели с известными данными, и отмечено их хорошее согласие.

В разделе 4.5 сформулированы основные выводы по четвёртой главе диссертации. Отмечено, что разработанное на базе расчётной модели программное обеспечение в дальнейшем может быть использовано для определения параметров установок по получению стабильных криогенных корпускулярных мишеней, что существенным образом позволит сократить временные и финансовые затраты на их создание.

Пятая глава посвящена результатам комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных капельных потоков из криогенных жидкостей применительно к задаче создания криогенных корпускулярных мишеней.

В разделе 5.1 дано подробное описание экспериментальной установки и отдельных её элементов и систем: криостата, камеры тройной точки (КТТ), вакуумных пролётных камер с разделительными шлюзами, ловушки гранул, вакуумной системы, системы охлаждения внутренней и внешней ванн, системы генерации монодисперсных капель и измерительной системы. Установка создана в результате совместной работы Московского энергетического института, Института теоретической и экспериментальной физики и Института ядерной физики г. Юлих (FZJ, Германия). Отмечено, что обработка показаний датчиков, контроль процесса получения капиллярных струй и капель, визуализация всей полученной информации и управление системами экспериментальной установки осуществляются в режиме «on line» с помощью автоматизированной системы управления и контроля. Для работы системы используется специально разработанное программное обеспечение.

Особо отмечено, что минимизация воздействия внешних и внутренних шумов на процесс распада струй на капли достигается с помощью безвибрационной схемы получения криогенных мишеней. Дано подробное описание безвибрационной схемы, состоящей из следующих элементов: теплообменников, конденсатора, генератора капель и двух ванн с охлаждающими веществами. Подбирая вещества в ваннах и охлаждая с их помощью рабочий газ, движущийся через теплообменники, конденсатор и генератор капель, можно получать криогенные мишени из любых газов.

На основании требований к параметрам криогенных корпускулярных мишеней разработан специальный генератор монодисперсных капель. Отмечено, что основным достоинством генератора является высокая стабильность характеристик, компактность и широкий диапазон рабочих частот. Представлены результаты экспериментов по определению амплитудно-частотной

характеристики генератора при низких температурах. В ходе многочисленных экспериментов установлено, что разработанный генератор при температурах от 16 K до 90 K может работать в течение длительного времени, сохраняя стабильными свои характеристики. Эксперименты проводились в течение нескольких лет. Длительность каждого, с учётом времени предварительного охлаждения и времени отогрева, составляла примерно 48 часов.

На основании анализа имеющихся технологических возможностей экспериментально протестированы различные технологии изготовления выходных насадок. Установлено, что для получения криогенных корпускулярных мишеней с диаметром гранул $D_c \leq 20$ мкм наиболее подходит технология изготовления насадок с помощью двухкомпонентного сопла. Отмечено, что основными достоинствами этой технологии являются: высокое качество каналов истечения насадки, получение каналов с минимальным размером и возможность визуального контроля процессов, происходящих в канале.

Основное внимание в разделе 5.2 уделено исследованиям, связанным с конструкционными проблемами получения тонких криогенных струй: влиянием конструкции схемы ожижения и влиянием примесей.

Представлены результаты проверки работоспособности программы, разработанной для определения теплофизических и геометрических характеристик элементов безвибрационной схемы ожижения. С помощью специально поставленных экспериментов показано, что расчётные и экспериментально измеренные расходы охлаждающего и охлаждаемого веществ хорошо согласуются друг с другом. В среднем, для всех охлаждаемых веществ (водород, азот и аргон) во всём исследованном диапазоне расходов погрешность составляет 30%. На основании результатов сравнения сделан вывод, что программа расчёта основных конструкционных элементов адекватно описывает теплофизические процессы получения криогенных корпускулярных мишеней, и её можно использовать для определения рабочих параметров мишеней.

Представлен анализ литературы, и сделан вывод, что экспериментальных работ по исследованию растворимости в жидком водороде, азоте и арго-

не малых количеств твёрдых примесей других газов мало, а экспериментальные работы по осаждению таких примесей в тонких капиллярах и вовсе отсутствуют. Отмечено, что наличие твёрдых растворённых примесей в сжиженном газе при длительной работе приводит к их осаждению на поверхности тонких сопел выходной насадки, уменьшая тем самым время непрерывной работы установок по получению криогенных мишеней.

Дано подробное описание методики, и приведены результаты экспериментального исследования влияния примесей на стабильность криогенных струй из водорода, азота и аргона. Эксперименты проводились при разной концентрации примесей K_g со струями диаметром D_j от 5 мкм до 35 мкм и при скоростях струй V_j от 5 м/с до 20 м/с.

В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных для времени работы мишеней из водорода, азота и аргона получена эмпирическая формула, позволяющая определять время работы мишени с достаточной для практических применений точностью:

$$T_p = 0,0103 \cdot \exp(-2,393 \cdot \lg(K_g)) \cdot (13,29V_j + 4896) D_j,$$

где: T_p – расчётное время работы (мин); V_j – скорость струи (м/с); D_j – диаметр струи (м); K_g – суммарное количество растворённых твёрдых примесей, находящихся в сжиженном рабочем газе (Об.%).

Раздел 5.3 посвящён исследованию проблем, связанных с капиллярным распадом и получением твёрдых мишеней из криогенных жидкостей. Представлены результаты, полученные в период с 1996 г. по 2010 г. совместной группой МЭИ, ИТЭФ и Института ядерной физики FZJ (г.Юлих, Германия).

Показано, что на процесс получения монодисперсных капель существенное влияние оказывают как температура и давление внутри генератора капель, так и температура и давление внутри камеры, в которую инжeksiруется криогенная струя. Дано подробное описание методики, и приведены результаты экспериментов с водородными и азотными струями.

Обнаружены новые нерэлеевские режимы неустойчивости струй, и определены характеристики области их существования. Кроме того, при малых

скоростях криогенных струй (V_j от 1 м/с до 6 м/с) обнаружен эффект нарушения исходной симметрии истечения, аналогичный эффекту «загиба струи» обычных жидкостей (раздел 4.1).

Получены эмпирические формулы, с помощью которых можно с достаточной для практических применений точностью определить границу начала режима устойчивой криогенной струи водорода и азота:

$$\text{для водорода} \quad P = 0,0013 \cdot \exp(0,338 \cdot T),$$

$$\text{для азота} \quad P = 10^{-6} \cdot \exp(0,186 \cdot T),$$

где: P – давление внутри генератора капель (бар), T – температура внутри генератора капель (К).

В ходе экспериментов по исследованию капиллярного распада криогенных струй для диапазона температур от 16 К до 90 К впервые определена нижняя граница начала области рэлеевского распада криогенных струй, и получен монодисперсный распад тонких струй водорода, азота и аргона диаметром от 5 мкм до 30 мкм. На основе анализа полученных результатов сделан вывод, что нижняя граница начала области рэлеевского распада струй из криогенных жидкостей смещается в область меньших скоростей и диаметров.

Обнаружено, что для струй азота и водорода с диаметром меньшим 30 мкм оптимальное волновое число k_m непостоянно и уменьшается с уменьшением диаметра струи. Получена эмпирическая формула, связывающая оптимальное волновое число k_m и диаметр струи D_j .

$$k_m = -4,218 / D_j + 0,846,$$

где: D_j – диаметр струи (мкм).

В соответствии с теорией Рэля-Вебера для маловязких жидкостей, оптимальное волновое число $k_m = 0,7$ и не зависит от диаметра струи. Полученные экспериментальные результаты означают, что классическая теория Рэля для распада тонких струй из криогенных жидкостей с диаметром меньшим 30 мкм не применима.

Отдельный подраздел главы посвящён проблемам получения твёрдых гранул из криогенных жидкостей. Отмечено, что особую важность для создания криогенных корпускулярных мишеней имеет вопрос взаимодействия капель с газом при их ускорении в шлюзах, связывающих вакуумные камеры друг с другом. Согласно оценкам, на выходе из шлюза может возникнуть скачок уплотнения. Если капли, вследствие переохлаждения, не успевают замёрзнуть при движении внутри шлюза, то при прохождении скачка уплотнения они могут взорваться. Отмечено, что точное значение величины возможного переохлаждения капель малого диаметра из криогенных жидкостей в силу сложности экспериментальных исследований в настоящее время неизвестно. Влияние скачка уплотнения исследовалось на примере разрушения капель водорода диаметром от 30 мкм до 50 мкм при прохождении капель через шлюзы разной длины и с разным выходным диаметром.

На основании сравнения экспериментальных результатов по прохождению шлюзов разной длины с результатами расчётов получена эмпирическая оценка температуры переохлаждения капель водорода — $\Delta T \approx 3K$, хорошо согласующаяся с расчётной оценкой температуры переохлаждения, основанной на вероятности образования зародышей новой фазы в среде переохлажденной жидкости. Подчёркнуто, что полученная эмпирическая оценка важна для точного определения времени замерзания капель и получения устойчивого потока криогенных мишеней.

Используя шлюзы длиной более 12 см, получены высокоскоростные монодисперсные потоки твёрдых гранул (мишеней), и впервые установлено, что распределение мишеней по углу вылета из шлюза и по скорости соответствует нормальному.

В разделе 5.4, являющемся заключительной частью главы, представлены наиболее важные научные результаты, полученные в ходе исследования тепловых и конструкционных проблем получения криогенных корпускулярных мишеней. На основании сравнения всей совокупности экспериментальных результатов с результатами численных расчётов с использова-

нием модели теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней сделан вывод, что модель, в целом, адекватно описывает теплофизические процессы и может быть использована для определения характеристик криогенных корпускулярных мишеней.

В выводах представлены наиболее важные научные результаты, полученные при выполнении всей диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

В диссертации изложены результаты по исследованию теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных монодисперсных капельных потоков, необходимых для создания космических капельных холодильников излучателей и для создания установок по получению криогенных корпускулярных мишеней.

Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан ряд оригинальных методик автоматизированной прецизионной диагностики характеристик ВКРС и капельных потоков. В основе методик лежит анализ изображений струи и капель, получаемых от цифровых камер, расположенных под углом девяносто градусов друг к другу. С помощью специально разработанного программного обеспечения в режиме «online» с достаточной для практических применений точностью можно определить следующие характеристики: скорость струи V_j , скорость капель V_c , длину нераспавшейся части струи L_j , диаметр струи D_j , диаметр капель D_c , изменение с течением времени амплитуды капиллярных волн δ , угловое отклонение оси струи от вертикали φ .

Тестирование методик и программного обеспечения при определении геометрических размеров известных объектов подтвердило их работоспособность и эффективность.

2. Для комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем получения стабильных капельных потоков создано несколько автоматизированных экспериментальных установок. Разработаны системы гене-

рации, и созданы прототипы: генератора монодисперсных капель для капельных холодильников излучателей и генератора монодисперсных капель для установок по получению криогенных корпускулярных мишеней. Протестированы различные технологии изготовления выходных насадок. Исследованы амплитудно-частотные характеристики генераторов и влияние на них высоких и низких температур.

2.1. Выявлено, что для получения капельных потоков малой плотности с диаметром капель $D_c \leq 100 \text{ мкм}$ из вязких жидкостей наиболее подходит технология изготовления насадок путём выдавливания, а для получения капельных потоков большой плотности с диаметром капель $D_c \geq 100 \text{ мкм}$ предпочтительнее технология изготовления насадок с помощью электроэрозии с предварительным выдавливанием.

2.2. Многочисленные эксперименты показали, что разработанный для капельных холодильников излучателей генератор монодисперсных капель может работать при температурах до 400 К , сохраняя в течение длительного времени стабильными свои характеристики. Экспериментально установлено, что при изменении температуры от 300 К до 400 К начальная амплитуда возбуждения δ_0 возрастает на 10 %, а при изменении частоты f_e от 200 Гц до 2000 Гц амплитуда δ_0 возрастает на 30-40 %. Пренебрежение влиянием частоты возбуждения и температуры на величину начальной амплитуды может привести к получению некорректных физических результатов.

2.3. Впервые экспериментально получены потоки большой плотности с малым угловым отклонением осей струй друг от друга. Максимально плотный поток состоял из 208 струй диаметром $D_j=200 \text{ мкм}$ с угловым отклонением осей струй друг от друга, не превышающим $0,0005 \text{ рад}$.

2.4. Выявлено, что для получения криогенных корпускулярных мишеней с диаметром гранул D_c от 20 мкм до 100 мкм наиболее подходит технология изготовления насадок с помощью электроэрозии, а для получения криогенных корпускулярных мишеней с диаметром гранул $D_c \leq 20 \text{ мкм}$ предпочтительнее технология изготовления насадок в виде двухкомпонентного сопла.

2.5. Экспериментально определена амплитудно-частотная характеристика генератора, разработанного для установок по получению криогенных корпускулярных мишеней, и исследовано влияние на неё низких температур. Многочисленные эксперименты показали, что разработанный генератор может работать при температурах от 16 K до 90 K , сохраняя в течение длительного времени стабильными свои характеристики.

2.6. Для минимизации воздействия внешних и внутренних шумов разработана безвибрационная схема получения криогенных мишеней, и создана специальная программа расчёта её основных конструктивных элементов. Разработана методика, и экспериментально определены расходы охлаждающего и охлаждаемого веществ, необходимых для получения монодисперсных капельных потоков из водорода, азота и аргона. Сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчётных данных, которые удовлетворительно согласуются друг с другом, показал, что созданная программа может использоваться для расчёта основных конструктивных элементов безвибрационной схемы с достаточной для практических применений точностью. Относительное среднеквадратичное отклонение экспериментальных результатов от расчётных не превышает $\approx 30\%$.

3. Проведены в широком диапазоне изменения динамической вязкости жидкости ($0,004\text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3\text{ Па}\cdot\text{с}$) системные экспериментальные исследования теплофизических проблем получения стабильных капельных потоков из вязких жидкостей, в результате которых определены закономерности влияния вязкости рабочей жидкости на характеристики режима перехода от капельного режима к струйному.

3.1. Установлено, что общим для насадок с разными выходными диаметрами является превышение давления прямого режима перехода (от капельного к струйному) над давлением обратного режима перехода (от струйного к капельному).

3.2. Впервые установлено, что в области больших вязкостей $0,02\text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3\text{ Па}\cdot\text{с}$ и малых скоростей струй ($Oh > 1, Re < 2$) границы начала области

рэлеевского распада для обоих режимов перехода смещены в область больших чисел Вебера и по-разному зависят от числа We .

3.3. Для определения границ прямого и обратного переходов получены эмпирические формулы, связывающие отношение $We/We_{кр}$ с числом Oh . Среднеквадратичное отклонение экспериментальных результатов от результатов расчёта по эмпирическим формулам составляет $\pm 2\%$.

4. Применительно к проблеме получения стабильных капельных потоков для капельных холодильников излучателей в широком диапазоне изменения динамической вязкости жидкости ($0,004 \text{ Па}\cdot\text{с} < \eta < 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$) проведены комплексные экспериментальные исследования, в результате которых определены закономерности: влияние вязкости на рост амплитуды возмущения; влияние вязкости на оптимальную частоту распада и влияние давления окружающей среды на устойчивость капельных потоков.

4.1. Экспериментально установлено, что при большой вязкости жидкости $\eta > 0,04 \text{ Па}\cdot\text{с}$ скорость роста волны возмущения замедляется. Чем больше вязкость, тем больше волна возмущения становится нелинейной, причём начало нелинейных эффектов приближается к месту истечения струи. Рост волны возмущения перестаёт быть монотонным и не может быть описан в рамках линейной теории Рэлея-Вебера.

4.2. В результате выполненных экспериментов установлено, что в области вязкостей $\eta > 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ($Oh^{-1} < 20$) и при малых скоростях ($Re < 20$) влияние вязкости и скорости жидкости на величину оптимального волнового числа k_m оказывается более существенным, чем предсказывает теория. В этой области отличие между экспериментально измеренным оптимальным волновым числом и числом, рассчитанным по теории Рэлея-Вебера, может достигать сорока процентов.

4.3. Получена эмпирическая формула, связывающая оптимальное волновое число k_m с числами Re и Oh . Среднеквадратичное отклонение экспериментальных результатов от результатов расчёта по эмпирической формуле не превышает десяти процентов.

4.4. В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных в диапазоне внешних давлений от 0 *бар* до 1 *бар* получены эмпирические формулы, связывающие относительные среднеквадратичные поперечное и продольное отклонения по скорости капель с величиной внешнего давления. Установлено, что развитие и продольной, и поперечной неустойчивости капельного потока происходит из-за того, что у капель, образующихся при монодисперсном распаде струй, имеется очень малый начальный разброс по скорости и размерам (предельная степень монодисперсности). Экспериментально получено, что минимальные относительные среднеквадратичные поперечное и продольное отклонения имеют следующие значения: $\sigma_{0Y} \approx \sigma_{0X} \approx 1 \cdot 10^{-5}$.

Полученные эмпирические формулы можно использовать для оценки предельно достижимых геометрических характеристик капельных потоков: максимально возможной длины потока L_{max} и максимально возможного расстояния между капельными струями в потоке h_{max} .

5. Выполнены пионерские экспериментальные исследования влияния на стабильность криогенных струй: примесей; температуры и давления внутри генератора капель; температуры и давления внутри камеры, в которую инжектируется криогенная струя.

5.1. В результате обработки экспериментальных данных для струй водорода, азота и аргона получена эмпирическая формула, связывающая время работы мишени T_p со скоростью струи V_j , диаметром струи D_j и с суммарным количеством растворённых твёрдых примесей, находящихся в сжиженном рабочем газе. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных результатов по определению времени работы мишени от результатов расчёта времени работы по эмпирической формуле не превышает $\pm 16\%$.

Использование эмпирической формулы позволяет определять время работы мишени с достаточной для практических применений точностью.

5.2. Впервые на основании результатов одновременного совместного измерения температуры и давления внутри генератора капель, температуры и

давления внутри камеры, в которую инжектируется криогенная струя, дано описание режимов получения криогенных струй водорода, азота и аргона: режима начального получения струи, режима неустойчивости струи и режима устойчивой криогенной струи. В ходе экспериментов обнаружены новые нерэлеевские режимы неустойчивости, и определены параметры области их существования.

5.3. Получены эмпирические формулы, позволяющие определить границу начала режима устойчивой криогенной струи для водорода и азота с достаточной для практических применений точностью. Методическая погрешность определения границы режима устойчивой криогенной струи не превышает нескольких процентов.

5.4. Впервые для водных струй и для струй из криогенных жидкостей обнаружен эффект отклонения водных и криогенных струй от оси симметрии при сохранении гладкой поверхности струи (эффект «загиба струи»). Для водных струй экспериментально изучено влияние на начало эффекта «загиба струи» и его дальнейшее развитие следующих параметров: диаметра струи D_j , скорости струи V_j и давления в вакуумной камере $P_{вк}$. Выявлено, что с уменьшением диаметра, скорости струи и давления в вакуумной камере угол загиба струи увеличивается до тех пор, пока струя остаётся жидкой. Установлено, что среднее значение давления начала эффекта «загиба струи» $P_{вк}^{cp}$ и давление насыщенных паров жидкости при данной температуре P_s связаны следующим образом: $P_{вк}^{cp} \approx 0,24 \cdot P_s$. Среднеквадратичное отклонение всех экспериментальных результатов от среднего значения давления начала эффекта «загиба струи» $P_{вк}^{cp}$ составило $\pm 18 \%$.

6. Совместно с ИТЭФ и Институтом ядерной физики FZJ (г.Юлих, Германия) впервые применительно к проблеме получения стабильных криогенных корпускулярных мишеней исследован капиллярный распад жидких криогенных струй и процесс получения твёрдых гранул.

6.1. Впервые получен монодисперсный распад тонких струй водорода, азота и аргона диаметром от 5 мкм до 30 мкм, и определены параметры об-

ласти монодисперсного распада. Экспериментально установлено, что нижняя граница начала области рэлеевского распада для криогенных струй смещается в область меньших скоростей и диаметров.

6.2. Впервые для струй азота и водорода с диаметром меньшим 30 мкм экспериментально обнаружена зависимость между значением оптимального волнового числа k_m и диаметром струи D_j . Это означает, что классическая теория Рэлея для распада тонких струй из криогенных жидкостей с диаметром меньшим 30 мкм не применима.

В результате обработки всей совокупности экспериментальных данных для тонких струй азота и водорода в диапазоне диаметров струй от 5 мкм до 30 мкм получена эмпирическая формула, связывающая оптимальное волновое число k_m и диаметр струи D_j .

6.3. Впервые экспериментально установлено, что капли с диаметром большим 50 мкм не успевают замёрзнуть в шлюзах длиной меньше 5 см и, в силу этого, под влиянием скачка уплотнения разрушаются на выходе из шлюза.

На основании сравнения экспериментальных результатов по прохождению шлюзов разной длины с результатами расчётов получена эмпирическая оценка температуры переохлаждения капель водорода — $\Delta T \approx 3K$, хорошо согласующаяся с расчётной оценкой температуры переохлаждения, основанной на вероятности образования зародышей новой фазы в среде переохлажденной жидкости.

Экспериментально получены высокоскоростные монодисперсные потоки твёрдых гранул (мишеней) из водорода, и для таких потоков впервые исследована функция распределения мишеней по углу вылета из шлюза и вид распределения мишеней по скорости. Установлено, что распределение мишеней по углу вылета из шлюза и по скорости соответствуют нормальному, и определены значения среднеквадратичного отклонения капель по углу вылета и относительное среднеквадратичное отклонение капель по скорости.

7. Полученные экспериментальные результаты были использованы при создании расчётной модели теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней. В модели учтены следующие физические процессы: капиллярный распад струй жидкого криоагента, теплообмен капель с окружающей средой и получение твёрдых гранул (мишеней), взаимодействие мишеней с газовым потоком в шлюзе.

На основе расчётной модели была создана программа по определению теплофизических параметров капель в разных камерах криогенной корпускулярной мишени. Задав начальные параметры и геометрию конструктивных элементов установки по получению мишеней, можно в любой камере установки определить: температуру и радиус мишени, процент испарения, поток массы с поверхности мишени, величину поперечного отклонения потока мишеней от оси, изменение давления внутри шлюза и скорость мишеней на выходе из него.

Проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными и данными, полученными другими авторами. На основе полного анализа результатов сравнения можно сделать вывод, что результаты расчёта по разработанной программе хорошо согласуются с известными данными.

Расчётная модель теплофизических процессов получения криогенных корпускулярных мишеней и программа расчёта характеристик основных конструктивных элементов криогенных мишеней — были использованы при создании прототипа криогенной корпускулярной мишени для нового европейского ускорителя ФАИР (FAIR) в г. Дармштадт (Германия).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты, включённые в диссертацию опубликованы в 53 печатных работах, из них 19 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, 1 монография, 2 российских патента на изобретение, 1 международный патент на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программного продукта, 29 в трудах и тезисах конференций:

Работы, опубликованные в в рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и международные системы цитирования Web of Science и Scopus:

1. Бухаров А.В. Теплофизические проблемы криогенных корпускулярных мишеней / А.В. Бухаров, А.Ф. Гиневский, А.Ю. Бурлакова // Вест. МЭИ. – 2015. – № 3. – С. 35–41.
2. Experimental Access to Transition Distribution Amplitudes with the PANDA Experiment at FAIR / B. P. Singh, A.V.Boukharov, S. Costanza et al. // The European Phys. J. – 2015. – V.51. – № 107. – P.1–19.
3. Бухаров А.В. Влияние вязкости жидкости на волновое число, соответствующее максимальной неустойчивости струи / А.В. Бухаров, С. В. Пепа // Вест. МЭИ. – 2014. – № 2. – С. 24–28.
4. New Type of Metal Targets / V.B. Ankudinov, A.V.Boukharov, V.P. Ogorodnikov, Y.A. Marukhin // Problems of Atomic Sci. and Tech. Ser. Nucl.- Phys. Research. – 2014. – № 3. – P. 190–192.
5. Technical design report for the PANDA (Anti Proton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker Strong Interaction Studies with Antiprotons / W. Erni, I. Keshelashvili, A. Aab, A. Boukharov et al. // The European Phys. J.– 2013.–V.49.– № 2. – P. 25.
6. Heat-Physical Problems of Cryogenic Corpuscular Targets / A.V.Boukharov, E.V. Ametistov, A.F. Ginevsky, M.A. Bukharova // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Ядерно-физ. иссл. – 2013. – № 6. – С. 205–208.
7. Экспериментальная установка по изучению процесса очистки и дезактивации загрязнённых поверхностей с помощью монодисперсных гранул льда / А.В.Бухаров, А.В.Балашов, Г.С.Сергеев и др. // Вест. МЭИ. – 2012. – № 3.– С.14–19.
8. Экспериментальная установка для изучения теплофизических процессов получения монодисперсных гранул льда / А.В.Бухаров, А.В.Балашов, В.Н. Могорычный, А.Д.Тимохин // Вест. МЭИ. – 2012. – № 1. – С. 49–53.
9. Search for New Forms of Matter in Antimatter–matter Interactions in the PANDA Experiment / A.V.Boukharov, A. N. Vasiliev, D. A. Morozov et al. // Atomic Energy. – 2012. – V. 112. – № 2. – P. 129–138.
10. Использование криогенной корпускулярной мишени для экспериментов по лазерному ускорению заряженных частиц / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.С. Герасимов, А.Ф. Гиневский // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Ядерно-физ. иссл. – 2010. – № 2. – С. 60–63.
11. Иммобилизация защитных культур для биоконсервации термически обработанных мясных изделий / Е.А.Баранова, А.В. Бухаров, В.В. Хорольский, Н.Г.Машенцева // Пищевая промышленность. – 2009. – № 10. – С.54–58.
12. Production of Hydrogen, Nitrogen and Argon Pellet with the Moscow-Julich Pellet Target / A.Boukharov, M.Büscher, V.Balanutsa et al. // Int. J. of Modern Physics E, Nuclear Physics. – 2009. – V.18. – Is.2. – P.505–510.

13. Dynamics of Cryogenic Jets: Non-Rayleigh Breakup and Onset of Nonaxisymmetric Motions / A. Boukharov, M.Büscher, V.Balanutsa et al. // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 100. – P.174505-1–174505-3.
14. Бухаров А.В. Моделирование поля температур в системе каплегенерации водородной криомишени / А.В.Бухаров, И. Н. Марышев // Вест. МЭИ. – 2006. – № 4. – С. 16–19.
15. Бухаров А.В. Экспериментальная установка для получения монодисперсных потоков вязких жидкостей / А.В.Бухаров, А.В. Блюдов // Вест. МЭИ. – 2006. – № 4. – С. 11–15.
16. Экспериментальная установка для получения твёрдых гранул водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др.// Вест. МЭИ. – 2006. – № 2. – С. 16–24.
17. Эксперименты по получению гранул из твёрдого водорода / А.В. Бухаров, М. Бюшер, А.А. Семёнов и др.// Вест. МЭИ. – 2006. – № 3. – С. 34–40.
18. Зависимость гранулометрического состава микрогранул с витаминами от способа их получения / Т.В. Максимова, А.В.Бухаров, В.А. Быков и др.// Вест. Рос. Унив. Дружбы Народов. Сер. Медицина: «Фармация». – 2004. – №4 (28). – С.209–215.
19. Бухаров А.В. Исследование поведения капиллярных сильноиспаряющихся струй жидкости в условиях вакуума / А.В. Бухаров, А.А. Семёнов // Вест. МЭИ. – 2003. – № 4. – С. 40–42.

Монографии по теме диссертации

- 1.Бухаров А.В. Криогенные корпускулярные мишени в энергетике / А.В.Бухаров, А.С.Дмитриев. – М.: МЭИ, 2013. – 144 с.

Изобретения по теме диссертации и свидетельства о регистрации программного продукта

1. Пат. 2298890 Российская Федерация, МПК Н 05 Н 3/00. Способ получения криогенной корпускулярной мишени и устройство для его осуществления / Бухаров А.В., Чернышев В.П., Чернецкий В.Д., Бюшер М.(Герм.); заявитель и патентообладатель Бухаров А.В – № 2005132792; заявл. 25.10.05; опубл. 10.05.07, Бюл. № 13.– 6 с.
2. Пат. WO 2008/125078 А3 Германия, МПК F 25J 1/02, H05H 1/22. Verfahren und Vorrichtung zur Kühlung eines Gases / Boukharov A. (RU), Büscher M. (DE); патентообладатель Forschungszentrum Jülich.– № 102007017212.7; заявл. 12.04.07; опубл. 02.04.08. – 23 p.
3. Пат. 2309832 Российская Федерация, МПК В 24 С 3/00. Установка для очистки поверхности / Бухаров А.В., Дмитриев А.С., Аметистов Е.В.; заявитель и патентообладатель Бухаров А.В. – № 2005132791; заявл. 25.10.05; опубл.10.11.07, Бюл. №31. – 5 с.
4. Свид. о рег. № 2015619172 Российская Федерация. Программа для определения характеристик жидких струй и капель «JET-1»/ Бухаров А.В., Куканов С.И.; заявитель Нац. исслед. университет «МЭИ».– № 2015616003/69; заявл. 02.07.15; опубл. 25.08.15.