

1564773

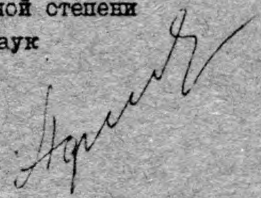
На правах рукописи

АФАНАСЬЕВ ВАЛЕРИЙ НИКАНОРОВИЧ

МОНОДИСПЕРСНЫЕ ПОТОКИ КАПЕЛЬ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва - 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (кафедра "Теплофизика" и отдел Теплофизики Научно-исследовательского института энергетического машиностроения).

Официальные оппоненты:

- Поляев В.М. - доктор технических наук, профессор
Базаров В.Г. - доктор технических наук, профессор
Деревич И.В. - доктор технических наук, профессор

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт химического машиностроения Российского космического агентства

Защита диссертации состоится "22" XII 1999г.
в 1430 часов на заседании диссертационного совета Д.053.15.09
при Московском государственном техническом университете

ртвовская набережная, д. I,
го машиностроение".
ознакомиться в библиотеке

в двух экземплярах, заверенных
направлять по адресу:
манская ул., д. 5,
секретарю диссертационного

_____ 1999 г.

го совета,

Воронецкий А.В.

1564773

НТБ ИТУ им. Н.Э. Баумана



1564773

Асанасьев В. Н. Монодисперс

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НЕ ВХОДИТ
В ОБЪЕМ РАБОТЫ

Актуальность работы. Увеличение мощности энергосистем и совершенствование оборудования ведет к усложнению систем обеспечения тепловых режимов и требует разработки и внедрения новых методов охлаждения. В связи с этим проблема обеспечения заданных тепловых режимов работы оборудования и его конструктивных элементов является весьма актуальной в энергетике, радиоэлектронной, лазерной, авиационной и ракетно-космической технике, химической и пищевой промышленности, а также в целом ряде других отраслей народного хозяйства. Эти проблемы являются определяющими и при создании высокотемпературных установок нового поколения.

В особом положении при решении этих задач находится транспортная энергетика и в первую очередь космическая и авиационная техника. Сброс теплоты в вакуум представляет собой одну из важнейших проблем практически для всех современных космических устройств, в которых широко используются излучатели из тепловых труб с удельной мощностью порядка 1 кВт/кг. Однако, в настоящее время во многих странах ведется разработка миллионкиловаттных космических энергостанций, для которых потребуются тепловые излучатели с удельной мощностью 30...40 кВт/кг. Для этих целей традиционные системы охлаждения, в том числе и на базе тепловых труб, неприемлемы, так как их масса может на порядок превышать массу всей энергосистемы. Необходим совершенно иной, нетрадиционный подход к данной проблеме.

Таким образом, чрезвычайно актуальной является проблема разработки и внедрения высокоэффективных, компактных систем охлаждения, что тесно связано с интенсификацией процессов теплопередачи.

Анализ показывает, что при разработке мощных энергосистем часто традиционные методы интенсификации, в том числе и метод развития поверхности теплообмена путем нанесения на нее системы лунок, подробно исследованный автором, не могут привести к значительному (на порядок и более) изменению характеристик существующих теплообменных аппаратов (ТОА). С другой стороны известно, что методы интенсификации процессов теплопередачи дают наибольший эффект, если они обеспечивают:

- во-первых, максимальное значение коэффициента теплопередачи, что реализуется в смесительных теплообменниках (СМ ТОА);
- во-вторых, максимальное развитие поверхности теплообмена;

М. Г. Т. У.
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

наиболее эффективно обеспечивают сферы одного размера, получение которых может быть обеспечено использованием в теплообменных аппаратах технологии струйной печати.

Поэтому одним из направлений решения данной проблемы может оказаться использование в системах охлаждения монодисперсных потоков капель, что обеспечивает им значительные преимущества по сравнению с обычными ТОА.

Повышенный интерес к ТОА, в которых используются монодисперсные потоки капель, обусловлен преимуществами, которые они имеют по сравнению с обычными ТОА. Одним из основных показателей работы ТОА является его удельная масса. Самые лучшие трубчатопластинчатые конструкции, включая и тепловые трубки, имеют удельную массу 5-10 кг/м². Удельная масса капельных ТОА, даже если в качестве теплоносителя использовать жидкие металлы, на один два порядка меньше чем у существующих теплообменников.

Другим параметром, характеризующим эффективность теплообменной поверхности является компактность (К) теплообменника. Компактными считаются теплообменные аппараты, у которых величина $K > 700 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Компактность теплообменников, применяемых в авиации и ракетной технике в настоящее время уже доведена до 8000 м²/м³. В случае использования монодисперсных потоков капель диаметром даже 0,30 мм (рекомендуются размеры капель менее 0,3 мм) дает коэффициент компактности порядка 20000.

Возможность применения в энергосистемах капельных теплообменников рассматривается в двух направлениях: первое - смесительные теплообменные аппараты (СМ ТОА), использующие все способы передачи теплоты. Исследования показали, что теплообмен при прямом контакте между газом и жидкостью, диспергированной до образования мелких капель, представляет собой заманчивый путь терморегулирования, поскольку СМ ТОА характеризуются высокой эффективностью теплопередачи при компактной геометрии и низкой массе.

Второе направление - это жидкостно-капельный радиатор (ЖКР), теплота в котором отводится излучением в вакууме, куда теплоноситель выбрасывается в виде монодисперсного потока капель.

Очевидно, преимуществами капельных ТОА и объясняется возросший интерес к данному направлению исследований. Работы ведутся, как в экспериментальном направлении по созданию капельных ТОА, так и в теоретическом по разработке методов расчета, но основным недостатком существующих методов является практически полное от-

существование экспериментального подтверждения данных расчетов. Что в общем-то объяснимо, так как речь идет о создании принципиально нового типа ТОА.

Несмотря на указание преимущества и большой объем работ, проделанный в направлении создания капельных ТОА - они все еще находятся в стадии концептуальной проработки в первую очередь из-за сложностей в получении монодисперсных потоков капель.

Следовательно, основным требованием при создании капельных теплообменников является получение монодисперсного потока капель, но вопрос: "Почему поток жидкости распадается на однородные капли?" - Не является очевидным. Объяснение лежит в процессе каплеобразования, который требует отдельного подробного рассмотрения.

Проведенные исследования показали, что для создания действующего образца капельного ТОА можно использовать достижения существующей технологии. Однако, потребуется значительная работа по решению множества технических проблем, прежде чем будет разработано устройство, имеющее практическое значение. Эти проблемы включают: технику генерации капель вязких жидкостей и металла с использованием технологии струйной печати; природа взаимодействий между жидкими каплями в условиях вакуума; проблемы совместимости материалов и ряд других проблем, т.е. потребуется детальное технологическое исследование, чтобы полностью оценить возможности этой концепции.

Учитывая вышесказанное, можно объяснить возросший интерес в мире к этому направлению исследований. Различными аспектами исследования и практического применения монодисперсных потоков вещества в настоящее время занимаются многие ведущие научные центры, как у нас в стране, так и за рубежом, такие как МГТУ, МЭИ, МАИ, С-П ГПУ, Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, СШ РАН, Вашингтонский университет, НАСА и такие ведущие аэрокосмические фирмы, как Boeing, McDonnell Douglas Aerospace, Grumman, и т.д.

Цель и задачи исследования. Основной целью настоящей работы является создание на базе существующей технологии моделей высокоэффективных капельных ТОА, способных передавать большие тепловые потоки при малой массе, а также создание научной базы разработки и конструирования капельных ТОА.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать и создать экспериментальный стенд для исследо-

вания капельных ТОА и их узлов;

- провести комплексные исследования процесса каплеобразования вязких жидкостей;

- исследовать существующие вибросистемы для выбора метода наложения синхронизирующих сигналов, необходимых для получения монодисперсных потоков капель;

- провести исследование теплофизических свойств материалов с целью выявления "кандидатов" в теплоносители капельных ТОА;

- аналитически исследовать и разработать методы расчета и оптимизации капельных ТОА с учетом потерь теплоносителя за счет испарения;

- разработать, создать и испытать модели капельных ТОА;

- разработать и экспериментально исследовать различные конструкции генераторов капель.

Научная новизна. В диссертационной работе представлены результаты теоретической и экспериментальной разработок нового научного направления - интенсификации теплообмена монодисперсными потоками капель в ТОА различного типа: "жидкость - газ" - для создания смесительных теплообменников; ЖКР - для отвода теплоты в вакууме излучением, некоторые массогабаритные и массоэнергетические параметры которых значительно, а в некоторых случаях более чем на порядок, превосходят соответствующие характеристики лучших существующих аналогов (удельная масса и удельная мощность теплообменной поверхности);

- впервые для сопел-фильтр экспериментально установлено наличие нескольких благоприятных частот бессателлитного процесса каплеобразования;

- впервые по результатам теоретических и экспериментальных исследований получена критериальная зависимость для оптимальной частоты бессателлитного процесса каплеобразования с минимальной длиной нераспавшейся части струи, обеспечивающей оптимальные массогабаритные и теплообменные характеристики устройств каплеструйной технологии;

- созданы и экспериментально испытаны рабочие модели капельных теплообменных аппаратов, обеспечивающих получение высоких значений коэффициентов компактности, удельных массы и мощности теплообменной поверхности, что говорит о больших потенциальных возможностях теплообменников данного типа;

- проведены аналитические исследования созданных моделей капель-

ных теплообменных аппаратов. Предложены методы их расчета, оптимизации и выбора их основных параметров; методы выбора теплоносителя, его расхода с учетом потерь за счет испарения; методы определения основных параметров капельного потока;

- впервые на основании экспериментально полученных и известных данных получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи в монодисперсном потоке капель;

- установлено, что для получения оптимальных параметров каплеобразования в создаваемых генераторах капель необходимо использовать цилиндрические сопла с коническим входом с углом раскрытия в пределах $70^\circ \dots 120^\circ$ с соотношением $\Delta/d = 0,5 \dots 1,5$; - разработаны, созданы и испытаны различные типы генераторов капель. Приведена методика расчета вибросистемы и выбора ее активных и пассивных материалов.

Практическая ценность. Выполненная диссертационная работа имеет теоретическое и практическое значение, т.к. результаты, полученные на основе разработанных теоретических положений определения оптимальной частоты каплеобразования, коэффициента теплоотдачи монодисперсного потока капель и эффективной излучательной способности оптически толстого, излучающе поглощающего капельного потока и результатов экспериментального исследования созданных моделей капельных ТОА, могут быть значительно ускорены сроки разработки и создания высокоэффективных, компактных капельных ТОА. Результаты работы использованы Научно - Производственным объединением "Астрофизика", Институтом Высоких Температур РАН и Секцией Прикладных Проблем при Президиуме РАН при разработке систем охлаждения в создаваемых высокотемпературных энергетических установках нового поколения. Материалы диссертации используются при чтении курса лекций по "Теплофизике" в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В целом материалы работы необходимо использовать научно-исследовательскими, проектно-конструкторскими организациями и предприятиями, использующими каплеструйную технологию (струйная печать, ТОА, гранулирование, камеры сгорания и т.п.).

Апробация работы. Основные положения работы и ее отдельные теоретические и экспериментальные результаты опубликованы, подавались и обсуждались в МГТУ им. Н.Э. Баумана (кафедра "Теплофизики", отделение ЭМ-2); в Московском Энергетическом Институте; в Московском Авиационном Институте; в ГИЦ РФ ЦИАМ им П.И. Баранова, НИИ ХИММАШ РКА, на Международных и Российских конференциях: Меж-

дународные Симпозиумы по теплопередаче (Минск 1988 и 1992 г.); Европейский семинар по теплопередаче (Бохум, Германия 1993 г.); 5-й Международный Симпозиум по теплопередаче (Париж, 1993г.); 3-я Международная конференция по теплопередаче, механики жидкости и термодинамики Понолулу, Гавайи 1993 г.; Российская Аэрозольная конференция (Москва 1993 г.); Международный Симпозиум по тепло- и массообмену в энергоустановках (Москва 1995 г.); Научно-техническая конференция, посвященная 165 летию МТУ им. Н.Э. Баумана (Москва 1996 г.); 10-я Всероссийская НТК, посвященная 150 - летию со дня рождения Н.Е. Жуковского (Москва 1996 г.); Международная конференция "Ракетные космические технологии" (Москва 1998 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации и обоснование выбора направления исследования опубликовано в 32 работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5-и глав, основных выводов, 2-х приложений и списка литературы. Работа содержит 436 страницы машинописного текста, в том числе: 91 рисунок, 9 таблиц, библиография насчитывает 352 наименования, фотографий 1.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы исследования, излагается цель работы, раскрываются ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе рассматриваются возможности использования монодисперсных потоков капель в ТОА различного типа, космических установках, в устройствах каплеотруйной технологии и т.п. Проведен обзор и анализ публикаций по этой тематике, а также указаны проблемы, которые необходимо решать при создании капельных ТОА.

Существующие системы охлаждения, используемые в мощных транспортных энергосистемах различного назначения, характеризуются высокой эффективностью и надежностью, а также приемлемыми массо-энергетическими параметрами. Однако, развитие транспортной энергетики и в первую очередь космической техники требует существенного улучшения характеристик бортовых систем, в том числе и систем охлаждения, которые должны обеспечить сброс отработанной теплоты в космос. Одним из направлений решения данной проблемы может оказаться использование в системах охлаждения монодисперсных потоков капель, что обеспечивает им значительные преимущества по

сравнению с обычными ТОА.

В работах Маттика, Хериберга, Брукнера, Паневина, Дмитриева, Клименко и др. оценивается возможность применения в транспортных энергосистемах капельных теплообменников. При этом рассматривается два направления их использования: СМ ТОА и ЖКР.

К первому типу ТОА относятся вихревой, портивоточный и прямоточный капельные ТОА, а также другие схемы теплообменников типа: "жидкость - твердое вещество" и "жидкость - газ".

Проведенные исследования показали, что теплообмен при прямом контакте между газом и потоком капель, представляет собой "заманчивый" путь терморегулирования в транспортной энергетике. Способность капельного СМ ТОА передавать теплоту непосредственно от жидкости к газу в широком интервале температур позволяет избежать многих ограничений, характерных для обычных ТОА, например их тенденции к разрыву под действием точечных дефектов. Смесительный ТОА характеризуется высоким значением КПД, низким падением давления газа при компактной геометрии и низкой массе. Несмотря на то, что установлено большое разнообразие методов создания смесительных теплообменников, большинство схем этих устройств все еще находится на стадии разработки и экспериментирования.

Наряду со СМ ТОА, в некоторых схемах конструкций, отводящих теплоту, отказываются от того, чтобы теплоноситель был заключен внутри кожуха или системы труб. Вместо этого нагретый теплоноситель непосредственно выводится в космическое пространство, где он охлаждается излучением. Такой тип ТОА может привести, как и смесительный теплообменник, к уменьшению удельной массы теплообменной поверхности излучателя более чем на порядок - это другой тип капельного теплообменника - жидкостной капельный радиатор (ЖКР). В настоящее время ЖКР (рис. 1) изучается и разрабатывается совместно НАСА и ВВС США. В отечественной литературе этот тип ТОА известен, как струйно-капельный излучатель (СКИД СМАЮ).

Теплоноситель 2 прокачивается через источник теплоты 1 и подается в генератор капель 3, который представляет собой камеру высокого давления с большим числом отверстий микронного размера. Жидкость в виде струек вытекает из отверстий в открытый космос. Под воздействием направленной вынужденной вибрации эти струйки распадаются на капли 4 определенного диаметра с равными промежутками между ними. Распад струи обеспечивает максимальную свободную поверхность капли при заданном объеме. Путем ориентации

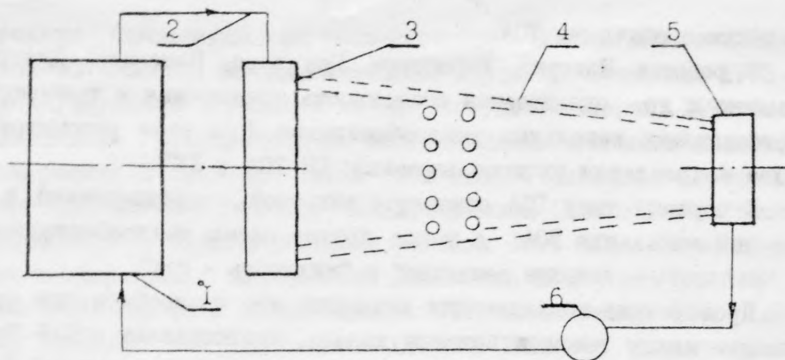


Рис. I

отверстий поток капель направляется в коллектор 5, где капли объединяются в единый поток жидкости, который с помощью насоса 6 возвращается в теплообменник. Отвод теплоты излучением происходит на участке между генератором и коллектором.

ЖКР обладает рядом преимуществ перед традиционными ТОА: излучающая поверхность ЖКР нечувствительна к воздействию потоков микрометеоритов, а также к действию оружия направленной энергии; обеспечивается достаточная простота разворачивания ЖКР в космосе; в сложенном положении ЖКР занимает малый объем в грузовом отсеке транспортного корабля или ракеты-носителя и т.п.

Очевидно, указанными преимуществами капельных ТОА и объясняется повышенный интерес в мире к этому направлению исследований.

Наиболее полное исследование ЖКР проведено в работах Паневина, который определял основные проблемы расчета ЖКР и направления их решения, для многих из которых дал решение, а также исследовал основные характеристики ЖКР. Однако, в работах Паневина ЖКР нацелены на обычные (не монодисперсные) потоки капель и, очевидно, поэтому в этих работах практически не рассматриваются процессы каплеобразования.

В работах Херцберга, Таусига и др. аналитическое исследование характеристик ЖКР проводится на базе только монодисперсных потоков капель, однако вопросам получения таких потоков уделяется очень мало внимания. Аналогичные тенденции наблюдаются и в публикациях по СМ ТОА, так в работах Братуты, Маттика, Брукнера и др. аналитически исследовано влияние различных факторов на их параметры, однако никаких попыток оптимизации СМ ТОА не предприни-

малось. Кроме того, в данных работах при расчете СМ ТОА использовались "стандартные" законы сопротивления и теплообмена, что не вполне оправдано в данных условиях, а также считалось, что поток газа не оказывает никакого влияния на процесс каплеобразования, который, как правило, вообще не рассматривался, использовался и ряд других предположений, требующих аргументированного обоснования или экспериментального подтверждения. Кроме того, как показано в работах Нагорного, Дмитриева, Хасакавы и др. в процессах распада жидких струй, особенно при монодиспергировании, много нерешенных вопросов. Требование монодисперсности потока обеспечивает максимальное развитие поверхности, равномерность охлаждения потока и кроме того упрощает аналитические методы исследования ЖКР, но в тоже время ставит более жесткие требования к конструктивному решению генераторов каплеструйных устройств.

Одним из основных узлов каплеструйных устройств является генератор, обеспечивающий получение монодисперсных потоков капель, что достигается наложением периодических возмущений на теплоноситель, однако выбор способа наложения возбуждений, как показано во многих работах, не однозначен.

Оценка возможностей капельных теплообменников достигается аналитическими расчетами, но при этом существует много проблем, требующих своего теоретического и экспериментального разрешения. Известные расчетные модели дают возможность оценить основные параметры и работоспособность отдельных узлов и ТОА в целом. Эти модели позволяют избежать многих ошибок и затрат при разработке и создании рабочих образцов канальных ТОА. Основным недостатком всех рассмотренных моделей является отсутствие экспериментального подтверждения данных расчетов.

В традиционных ТОА излучение представляет собой поверхностное явление, что позволяет, перед проведением анализа теплового режима, определить оптические характеристики поверхности теплообмена. Однако, ЖКР нельзя подвергнуть непосредственному анализу с использованием тех же самых методик. Объемная природа излучательного явления в капельном слое выдвигает дополнительные сложности при описании механизма теплообмена в ЖКР.

Для того, чтобы сбросить в окружающее пространство заданный тепловой поток, требуется определенный массовый расход теплоносителя. При выборе теплоносителя для ЖКР также возникает много проблем, которые требуют своего разрешения, но главной проблемой яв-

ляется обеспечение минимальных потерь теплоносителя за счет испарения. Это требование диктует использование жидкостей с низким давлением паров насыщения.

Несмотря на указанные преимущества и большой объем работ, проделанный в направлении создания капельных ТОА, тем не менее они все еще находятся в стадии концептуальной проработки. Для создания натурного образца как ЖРП, так и СМ ТОА предстоит еще решить много различного рода проблем.

Основной проблемой все еще остается вопрос создания действующей модели капельного теплообменника на базе существующей технологии. Рассмотренные в обзоре работы и патентное исследование по изучению капельных ТОА и их узлов не дают пока исчерпывающего ответа на этот вопрос. Продолжаются работы по исследованию излучательного процесса от плотных капельных потоках, остается открытым вопрос с выбором способа наложения синхронизирующих возмущений для получения монодисперсного потока капель.

Проблемы каплеобразования, несмотря на высокий уровень знаний в этой области, остаются, и вызваны они в первую очередь специфическими условиями работы данного типа ТОА: космический вакуум, теплофизические свойства теплоносителей, совместимость материалов и т.п.

В заключении первой главы сформулированы вышеуказанные цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены аналитические методы исследования капельных теплообменников и процессов происходящих в них.

Предлагаемая в работе теоретическая модель процессов в смесительных ТОА может быть описана уравнениями неразрывности, количества движения, сохранения энергии, а также рядом других соотношений, определяющих интенсивность гидродинамического и теплообменного взаимодействия на границе поверхности раздела фаз.

Предполагается, что теплообменник представляет собой цилиндрическую камеру с адиабатной боковой стенкой. Капли инжектируются аксиально, имеют одинаковые размеры и равномерно распределены по площади потока. Текущий в противоположном направлении газ имеет однородный радиальный профиль скорости.

Уравнения неразрывности для газа и капель при постоянной площади потока имеют вид:

$$\rho - \rho \rho w = \text{const} \quad (1)$$

$$\rho \rho_k w_k = \text{const} \quad (2)$$

где β — объёмная доля капель, которая в рассматриваемых случаях принимается равной $\beta \ll 1$ и, следовательно, $(1 - \beta) \sim 1$ в широком диапазоне давлений, температур и относительных скоростей.

Отношение массовых расходов капель и газа может быть выбрано произвольно, но обычно оно подбирается с таким расчетом, чтобы увеличить эффективность теплообменника до предела или получить заданный температурный профиль на выходе из ТОА. В большинстве случаев можно ожидать, что это отношение будет близко к обратному отношению удельных теплоемкостей.

Интегрирование уравнений движения, дает возможность получить такие ее кинематические характеристики, как скорость, время пребывания в активном пространстве теплообменного аппарата, а также геометрические параметры траектории.

В рамках принятых для СМ ТОА допущений уравнения движения для капли и газа имеют вид:

$$\rho_k w_k \frac{dw_k}{dx} = \rho_k g - \frac{3}{4d_k} \rho C_D \Psi_D |w_k - w| (w_k - w) \quad (3)$$

$$\rho w \frac{dw}{dx} = - \frac{dp}{dx} - \frac{3}{4d_k} \beta \rho C_D \Psi_D |w_k - w| (w_k - w) \quad (4)$$

где C_D и Ψ_D — коэффициенты, учитывающие сопротивление и деформацию капель.

Анализ показывает, что достоверность результатов, полученных при решении уравнений (3) и (4), определяется в основном тремя условиями: выбором аппроксимирующих выражений для коэффициента C_D и функции Ψ_D ; оптимальным назначением величин, связанных с процедурой численного метода интегрирования; корректностью задания условий однозначности.

Учитывая, что теплопроводность капельных теплоносителей (в первую очередь жидких металлов) на несколько порядков выше, чем у газов, можно допустить, что внутри капель температура однородна. С учетом принятых в работе допущений уравнения энергии для капельного потока и газа соответственно имеют вид:

$$\rho_k w_k \frac{dT_k}{dx} = - \frac{6 Nu \lambda}{C_k d_k^2} (T_k - T) - \Psi \quad (5)$$

$$\rho w \frac{dT}{dx} = \frac{6 Nu \lambda}{C_p d_k^2} \beta (T_k - T) + \Theta \quad (6)$$

где Ψ и Θ — параметры, учитывающие теплообмен излучением между

потоком и каплями.

Средние по всей поверхности сферы коэффициенты теплоотдачи измеряли многие исследователи. В работах Кутателадзе на основании многочисленных экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость для теплообмена единичной сферы:

$$Nu = 2 + 0,03 Pr^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 Pr^{0,35} Re^{0,58} \quad (7)$$

Нигматулин Р.И. для расчета теплообмена в капельных потоках рекомендует зависимость:

$$Nu = 2 + 0,46 Pr^{0,33} Re^{0,55}, \quad (8)$$

которая дает результаты близкие с (7). Эти зависимости охватывают широкую область по числам Рейнольдса и Прандтля ($Re = 1...3 \cdot 10^5$, $Pr = 0,6...8 \cdot 10^3$). Однако в области низких чисел $Re < 200$ наблюдается значительное расхождение с экспериментом.

Брукнер и Маттик, учитывая отсутствие согласующихся данных по числу Нуссельта для капельных потоков в СМ ТОА, используют зависимость, также относящуюся к единичной сфере:

$$Nu = 2 + 0,74 Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad (9)$$

Работы, цитируемые выше (Брукнер, Маттик и др.), посвящены в основном теоретическому исследованию характеристик СМ ТОА. Однако, работы, посвященные изучению, особенно экспериментальному, капельных ТОА с использованием монодисперсных потоков капель практически отсутствуют.

Таким образом, необходимо или экспериментально подтвердить правомочность использования известных зависимостей, или на основании экспериментальных данных получить зависимость, пригодную для расчета коэффициента теплоотдачи в монодисперсном капельном потоке.

Решение системы уравнений (1...6) входит в виде подпрограммы в алгоритм расчета СМ ТОА.

Быстрое развитие космической техники и, следовательно, качественное отличие каждой новой серии аппаратов от предыдущей не дает возможности воспользоваться ранее разработанными и апробированными в земных условиях техническими решениями для определения параметров ЖКР: выбора и расхода теплоносителя, его запаса для компенсации потерь за счет испарения; определения параметров капельного листа и т.п.

В работе предложен метод расчета ЖКР, в котором из балансового уравнения:

$$q_{\text{ср}} dT = \epsilon \sigma_0 T^4 f_0 F_k dt \quad (10)$$

определяется время полета капли от генератора до коллектора капель:

$$\tau = \frac{\rho_a \rho_a}{3 \epsilon \sigma_0} \left(\frac{1}{T_1^3} - \frac{1}{T_0^3} \right) \quad (11)$$

где $\rho_a = \rho d_k/6$ — удельная масса капельного листа, кг/м².

При разработке расчетной модели ЖКР первоначально выбирается его схема. Излучающей поверхностью ЖКР является капельная пелена, длина которой определяется с учетом определенного времени полета капли (11). Капельной пелене можно придать форму прямоугольника с прямоугольным коллектором капель или форму равнобедренного треугольника с центробежным коллектором капель, расположенным в фокальной плоскости. При этом, рассматриваются два варианта расчета ЖКР.

Первый — при низкой капельной плотности капли излучают тепловую энергию независимо друг от друга — такой вариант ЖКР отличается наименьшей массой, но при этом имеет и наибольшие размеры.

Второй — при более высокой капельной плотности возрастает оптическая толщина капельного листа, поэтому излучение от капель, расположенных ближе к центральной части листа, ослабляется соседними каплями. Тем не менее суммарная излучательная способность капельного листа увеличивается за счет многократного отражения соседними каплями, в связи с чем снижается необходимая площадь излучения листа. Результирующий поток излучения такого оптически толстого излучающе-поглощающего капельного листа складывается, как известно, из собственного и отраженного потоков излучения капельного слоя, при нахождении которых определяются оптические характеристики капельного потока. Оптическая толщина s определяется из уравнение переноса лучистой энергии в поглощающе — излучающей среде, ее выбор является компромиссом между размером излучающего капельного потока и его массой и имеет вид:

$$s = \frac{N_0 f_0 \pi d_k^2}{4 N w} \quad (12)$$

При определении результирующей плотности потока излучения вводится эффективная излучательная способность капельного листа:

$$\bar{\epsilon} = [1 - e^{-s}(1 - \epsilon)] \quad (13),$$

которая может значительно превышать собственную излучательную способность капли. Анализ уравнения (13) показывает, что резкий рост эффективной излучательной способности характерен для малых оптических толщин $s < 1$ и что существует область наиболее благо-

приятных значений оптической толщины ($s = 3...5$), значения $s > 5$ приводят к ухудшению характеристик капельного потока. Это хорошо согласуется с данными Маттика, Брандела и др. и кроме того, аналогичные результаты получены Зигелем, Паневиним, методы расчета ЖКР которых более трудоемки и громоздки, но они учитывают изменение температуры поперек слоя.

Учитывая трудности получения монодисперсных потоков капель, в работе особое место занимает вопросы каплеобразования.

Среди известных способов получения монодисперсных потоков капель наиболее подходящим представляется способ вынужденного капиллярного распада струй. Основные положения теории каплеобразования были разработаны в работах Рэлея, который показал, что воздействуя на ламинарную струю сигналом синусоидальной формы, можно получить монодисперсный поток капель. Система уравнений, записанная для малых возмущений, накладываемых на струю имеет вид:

$$\frac{\partial(u_0 + u_1)}{\partial \tau} = -\frac{I}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2(u_0 + u_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(u_0 + u_1)}{\partial r^2} + \frac{I}{r} \frac{\partial(u_0 + u_1)}{\partial r} \right] \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(v_0 + v_1)}{\partial \tau} = & -\frac{I}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2(v_0 + v_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(v_0 + v_1)}{\partial r^2} + \right. \\ & \left. + \frac{I}{r} \frac{\partial(v_0 + v_1)}{\partial r} - \frac{(v_0 + v_1)}{r^2} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial(u_0 + u_1)}{\partial x} + \frac{I}{r} \frac{\partial[r(v_0 + v_1)]}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

В результате решения данной системы, Рэлей получил основные параметры каплеобразования идеальной жидкости: длину нераспавшейся части струи (ДНЧС), диаметр капли и указал на существование оптимальной частоты распада струи. Но, как показал экспериментально и теоретически Вебер, для вязких жидкостей эти зависимости имеют иной вид.

Из теории следует, что на процесс каплеобразования влияют свойства жидкости, геометрия сопла и скорость истечения струи, которая может выбираться в определенных пределах. Максимально допустимая скорость истечения струи жидкости определяется из условия ламинарного течения жидкости в каналах. Минимальная скорость

истечения, при которой начинается процесс монодиспергирования определяется из соотношения между потенциальной энергией струи и потенциальной энергией образующихся из нее капель.

Длина нераспавшейся части струи зависит от условий ее распада и свойств жидкости, является определяющим при конструировании генераторов капель и в большинстве случаев задает нижний предел массогабаритных характеристик генераторов каплеструйных устройств. Зависимость для определяется ДНЧС, получается в результате решения системы уравнений (П4...П6).

Несмотря на многочисленные публикации в области каплеобразования, многие вопросы гидродинамики, тепломассообмена и гидроакустики при истечении струи из насадков различной конструкции, в особенности из насадков малого диаметра ($d_c < 1$ мм), остаются неизученными. Кроме того, в большинстве случаев эти проблемы рассматривались раздельно, без учета их взаимосвязи и взаимного влияния.

В третьей главе показано, что для решения поставленных задач на кафедре "Теплофизика" МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования процессов каплеобразования как в атмосфере, так и в условиях вакуума, а также исследовать создаваемые модели смесительных ТОА и жидкостно-капельных радиаторов. Вакуумная система стенда состоит из двух вакуумных установок: низкотемпературной для исследований теплообменных аппаратов на вакуумных маслах и силиконовых жидкостях при температурах 280...350 К; высокотемпературная для исследований аппаратов, работающих на жидких металлах при температурах 350...500 К. Вакуумная система спроектирована и выполнена по требованиям, предъявляемым к установкам такого типа. В главе 3 также дано описание и принцип работы вакуумного стенда.

Исследование процессов каплеобразования проводилось на экспериментальной установке, которая может быть условно разделена на следующие элементы: жидкостно-капельный генератор; контрольно-измерительная система; система визуализации процесса каплеобразования.

Генератор капель – одна из наиболее важных частей установки, в которой происходит формирование струи за счет продавливания жидкости через отверстия в оменных сопловых насадках с разными отношениями длины сопла к его диаметру L/d . Диаметры отверстий изменялись от 0,3 до 1,0 мм.

Длина нераспавшейся части струи (ДНЧС) определялась визуаль-

но в стробоскопическом освещении с помощью катетометра КМ-6 и контролировалась выборочным фотографированием.

Исследована дисперсность размеров капель, в получаемых капельных потоках. Максимальное отклонение диаметра капель от среднего значения находится в пределах 2 %.

В работе проведена оценка точности полученных результатов, приведены максимальные относительные ошибки основных экспериментально определенных и рассчитанных параметров.

Учитывая важность получения монодисперсного потока капель, в главе рассмотрены вопросы выбора типа пьезопреобразователя и методы его расчета. Вид механической колебательной системы преобразователя определялся главным образом рабочей частотой вибродвигателя. Рабочая частота выбиралась исходя из требований, предъявляемых к ТОА: необходимый теплосброс; интервал рабочих температур; теплофизические свойства используемого теплоносителя; потери теплоносителя за счет испарения и т.п.

Так как работ, посвященных использованию ультразвуковой технологии в капельных теплообменниках, практически нет, рассмотрены основные особенности конструирования генераторов капель и пьезоэлектрических преобразователей к ним. Приведен порядок расчета составного пьезопреобразователя, представлены схемы конструктивного решения генераторов капельных ТОА, разработанных, изготовленных и исследованных в рамках данной работы.

Четвертая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов каплеобразования и выбору теплоносителей для капельных ТОА: сформулированы требования предъявляемые к ним; приведены наиболее вероятные "кандидаты" в теплоносители и дана методика определения потерь теплоносителя за счет испарения.

Выбор теплоносителя, влияет практически на все технико-экономические характеристики ТОА. К теплоносителю предъявляется много порой противоречивых требований, но более узко требования к теплоносителям можно сформулировать следующим образом - теплоносители для капельных ТОА должны иметь: низкое давление паров насыщения; низкую вязкость, высокую излучательную способность; высокий коэффициент поверхностного натяжения и среднюю плотность; а также высокую теплоемкость и высокую теплопроводность; кроме того, теплоносители должны быть совместимы с материалами генератора, коллектора и других узлов капельного ТОА.

При выборе теплоносителя для ЖР одним из основных является требование обеспечения минимальных потерь материала капель за счет испарения. Это диктует использование теплоносителей с низким давлением паров насыщения, так как известно, что при повышении температуры на 5 % давление паров и удельный поток массы испаряющегося материала возрастают более, чем на порядок.

Капельные ТОА можно разбить на три температурные группы: высокотемпературные (550 - 1000 К) - лучший теплоноситель - олово; ТОА среднего интервала температур (350 - 550 К) - эвтектики металлов и щелочные металлы; низкотемпературные ТОА (270 - 350 К) - вакуумные масла и силиконовые жидкости.

В главе приведены результаты комплексного исследования процессов каплеобразования и в частности изучено влияние геометрии насадков, скорости истечения, температуры и теплофизических свойств жидкостей, спектрального состава и амплитуды сигнала возбуждения на ДНЧС. Результаты данных исследований опубликованы и докладывались на Российских и Международных конференциях.

В большинстве исследований использовалось цилиндрическое сопло с острыми входными и выходными кромками, длиной $\Delta = 0,6$ мм и диаметром отверстия $d_0 = 0,425$ мм. В качестве рабочего тела использовалось масло ТМ-Г при температуре 30° С.

Представленная на рис. 2 экспериментальная зависимость ДНЧС от частоты вынужденных колебаний при разных амплитудах возбуждения пьезоэлемента и скорости истечения $W = 3,06$ м/с в бесоателлительной области каплеобразования имеет волнообразный характер и содержит два явно выраженных минимума в отличие от теории и аналогичных исследований МЭИ, где говорится о наличии лишь одного минимума. Кроме того, эти минимумы более резко проявляются с повышением скорости истечения, что хорошо демонстрирует рис. 3.

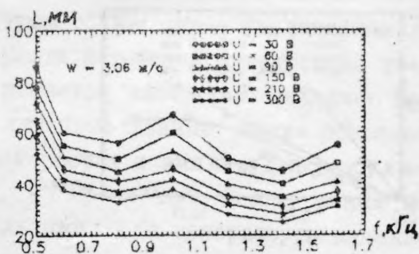


Рис. 2

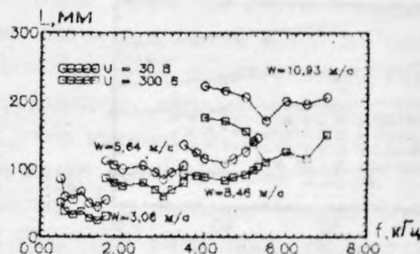


Рис. 3

Из рассмотрения рис. 3 видно также, что с увеличением скорости истечения струи частотный диапазон бессателлитного распада смещается вправо - в область больших величин частоты каплеобразования и кроме того увеличивается ДНЧС. С увеличением амплитуды накладываемого на струю сигнала возмущения ДНЧС уменьшается.

В абсолютном большинстве известных работ по экспериментальному изучению параметров каплеобразования исследовались изотермичные потоки, что не характерно для капельных ТОА. В данной работе было исследовано влияние температуры на параметры каплеобразования. На рис. 4 представлены минимальные ДНЧС в зависимости от температуры жидкости при постоянной амплитуде возмущения, видно, что ДНЧС с увеличением температуры уменьшается - это связано с уменьшением вязкости и улучшением процесса каплеобразования.

Процессы каплеобразования маловязкой жидкости относительно хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально. Однако, возросший интерес к монодисперсным потокам капель интенсифицировал исследования влияния вязкости жидкости на процессы каплеобразования. Экспериментальных работ по каплеобразованию вязких жидкостей очень мало [ИЭИП и, поэтому любая информация, полученная в этом направлении, представляет большой как практический, так и научный интерес.

В качестве рабочих тел использовались вакуумные масла ВМ-4, ВМ-5 и ТМ-1, а также дизельное топливо - Д, вязкость которого близка к вязкости хорошо исследованных водноглицериновых растворов. Кинематическая вязкость данных рабочих тел в исследованном температурном интервале существенно отличается. Так вязкость ВМ-4 более чем в 300 раз превосходит вязкость воды.

Исследования влияния рода жидкости показали, что полученные

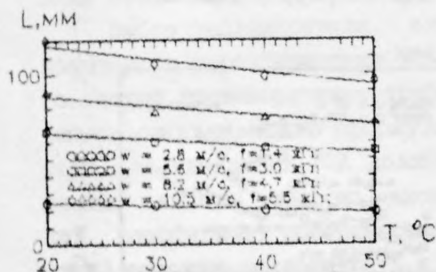


Рис. 4

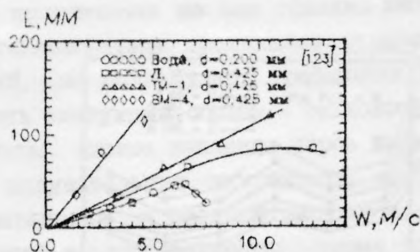


Рис. 5

результаты для ТМ-I и дизельного топлива близки, т.к. их вязкости мало отличаются, а у ВМ-4 при низких температурах и малых скоростях лишь один минимум, что соответствует результатам аналогичных исследований Аметистова, Гунбина, полученных на ВМ-I. Следует также отметить, что с увеличением вязкости заметно уменьшается и смещается в область малых величин частотный диапазон каплеобразования и увеличивается ДНЧС. Наиболее наглядно зависимость ДНЧС от скорости и рода жидкости показана на рис. 5, где полученные результаты сравниваются с аналогичными данными Гунбина для воды. Из анализа полученных данных видно, что род жидкости существенно сказывается на ДНЧС как качественно, так и количественно. При малых скоростях у всех жидкостей зависимость ДНЧС от скорости линейная. Известно (Нагорный, Безруков), что при дальнейшем увеличении скорости ДНЧС начинает уменьшаться. Это хорошо видно на примере данных для воды (Гунбин), при более высоких скоростях это наблюдается и у топлива Л. Для ТМ-I и ВМ-4 в интервале данного изменения скоростей "завала" не наблюдалось, что соответствует результатам работы Китамури.

Исследования влияния геометрических параметров сопла (диаметра, длины и формы) на процесс каплеобразования показали, что для сопел с $\Delta/d < 1,5$ кривая зависимости ДНЧС от частоты имеет несколько минимумов, т.е. для таких сопел (Фильер) существует несколько частот "благоприятного" распада. При возрастании скорости истечения струи и уменьшении длины сопла количество минимумов увеличивается. У сопел большой длины, как правило, существует лишь один ярко выраженный минимум.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что длина сопла практически не влияет на значение основного частотного минимума - он определяется в основном скоростью струи и диаметром сопла, но с увеличением длины сопла при одной и той же скорости истечения значительно увеличивается ДНЧС и существенно уменьшается частотный диапазон бескапельного каплеобразования. Полученные данные также показывают, что наименьшую ДНЧС при всех скоростях и амплитудах возбуждения имеют сопла меньшей длины.

Кроме того исследования показали, что наиболее предпочтительными для генераторов капельных ТОВА, при умеренных скоростях, являются цилиндрические сопла с острыми входными и выходными кромокми с $0,5 < \Delta/d < 1,5$, что находится в хорошем соответствии с данными Нагорного, Безрукова, Аметистова, Гунбина, Хасакиви, Ка-

вады и др.

Исследования также показали, что для повышения коэффициента расхода сопел генераторов капель необходимо входной части сопла придавать плавные очертания - радиус скругления или использовать конический вход в сопло с углом раскрытия в пределах $70^\circ \dots 120^\circ$.

Анализ опубликованных работ и результаты данных исследований позволяют сделать вывод, что для каждой скорости истечения при фиксированном диаметре сопла существует определенный частотный диапазон устойчивого каплеобразования:

$$\frac{w}{3,5 d} > f > \frac{w}{7 d} \quad (17)$$

При частотах ниже минимального предела возникают сопутствующие образования - сателлиты, в то время как частоты выше максимального предела ведут к агломерации, т.е. и то и другое ведет к каплям различного размера. Вместе с тем для большинства современных применений проблема монодисперсности является определяющей.

Используя уравнений (14, 15) и теорию подобия, в работе получена критериальная зависимость частоты каплеобразования от числа Рейнольдса:

$$S = C Re^n. \quad (18)$$

Известно, что такого рода зависимости применимы лишь в тех пределах изменения аргумента, в которых они подтверждены опытом. В данных исследованиях число Рейнольдса изменялось в пределах 2,5 ... 1200. Используя полученные экспериментальные данные (рис. 6) и уравнение (18), определены значения констант C и n для оптимальной частоты распада струи, соответствующей бессателлитному процессу распада струи с минимальной ДНЧС, и уравнение (18) принимает вид:

$$S_{opt} = 0,0812 Re^{1,18} \quad (19)$$

Таким образом, получен один из определяющих параметров теории каплеобразования, влияющий практически на все массогабаритные и теплообменные характеристики устройств каплеструйной технологии (струйная печать, гранулирование, ТОА, камеры сгорания и т.п.).

Пятая глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов теплообмена в капельных ТОА.

В работе созданы и экспериментально исследованы низкотемпературные модели ЖРП и СМ ТОА с генератором капель, использующим в качестве сопел сопловые матрицы с 10, 20, 30 и 40 соплами по 10 сопел в ряд.

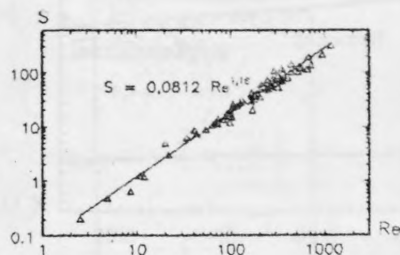


Рис. 6

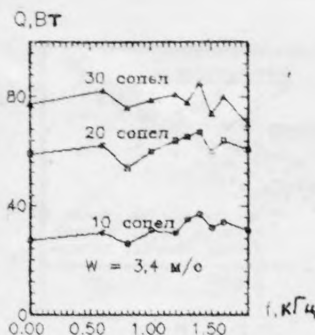


Рис. 7

Экспериментально исследована модель смесительного низкотемпературного теплообменника, работающего на ТМ-I при максимальной температуре порядка 325 К. На рис. 7 дана зависимость количества теплоты, отводимой от капель потоком газа, от частоты возбуждения и количества сопел. Видно, что количество теплоты практически пропорционально количеству сопел, а ее зависимость от частоты имеет сложный характер. Максимальный же выигрыш в количестве отведенной теплоты по сравнению со струйным истечением наблюдается на оптимальной частоте и составляет порядка 15%.

Как показано в главе 2, при расчете СМ ТОА существует неопределенность с коэффициентом теплоотдачи, поэтому на данной модели СМ ТОА при различных скоростных и тепловых режимах на оптимальной частоте распада струи экспериментально определялся коэффициент теплоотдачи монодисперсных капельных потоков к газу. На основании полученных экспериментальных и известных данных других авторов для расчета коэффициента теплоотдачи в монодисперсном потоке капель в диапазоне изменения числа Рейнольдса от 1 до 10^4 была получена следующая зависимость:

$$Nu = 2 + 0.2 Pr^{0.33} Re^{0.56} \quad (20)$$

На рис. 8 представлены полученные экспериментальные данные и известные данные для одиночной сферы (Кутателадзе), а также данные МЭИ для цепочки монодисперсных капель, там же приведены результаты расчета коэффициента теплоотдачи по приведенным выше зависимостям. Видно хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными зависимостями, но необходимо отметить, что в области малых значений чисел Рейнольдса, характерных для СМ ТОА, полученная зависимость, лучше соответствует экспериментальным данным.



Рис. 8

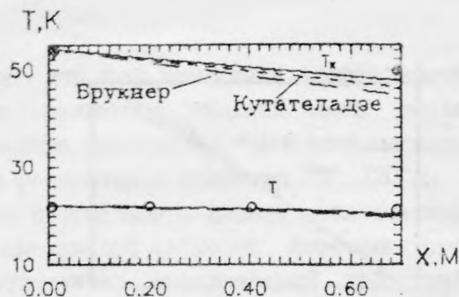


Рис. 9

На рис. 9 приведено сравнение изменения температуры газа и капли по длине ТОА, рассчитанное по предложенной в главе 2 методике, с экспериментальными данными. Видно, что лучшее совпадение эксперимента с расчетом демонстрирует предлагаемая зависимость.

Проведенные исследования смесительного ТОА показали, что непосредственный контакт между газом и диспергированным в виде монодисперсных капель теплоносителем может обеспечить большую компактность, меньшую массу и более высокую эффективность теплопередачи по сравнению с обычными ТОА трубчатого типа, кроме того впервые получены данные по теплообмену в монодисперсных потоках капель и зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи в них.

Результаты экспериментального исследования в вакууме низко-температурной модели ЖКР, работающей на ВМ-5с, максимальная температура которого поддерживалась постоянной и равной 325 К, приведены на рис. 10, где даны количества отведенной теплоты в зависимости от оптической толщины капельного потока. Видно, что совпадение количеств теплоты, отведенных от потока капель излучением и определенных различными способами, находится в пределах $\pm 15\%$. Определены и другие параметры ЖКР, такие как коэффициент компактности теплообменной поверхности – более $7000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, удельная масса порядка $0,1 \text{ кг}/\text{м}^3$ и удельная мощность $2,65 \text{ кВт}/\text{кг}$, что указывает на превосходство данного типа ТОА над существующими.

С использованием предложенной в главе 2 методики было проведено аналитическое исследование характеристик ЖКР. Расчитан литиевый ЖКР с тепловой нагрузкой 5,5 МВт. Температура теплоносителя на выходе из генератора $T_0 = 528 \text{ К}$ и на входе в коллектор $T_1 = 460 \text{ К}$. Суммарное время работы аппарата пять лет. Подобный ЖКР был расчитан Брукнером (пунктир) и поэтому сопоставление полученных результатов указывает на точность предлагаемого метода расчета.

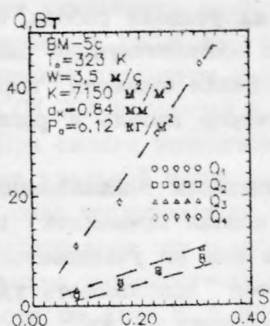


Рис. 10

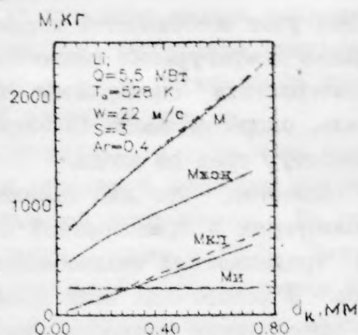


Рис. 11

На рис. 11 представлены зависимости суммарной массы ЖКР и массы его компонентов в функции от диаметра капель. Основными расчетными параметрами являлись масса капельного листа и масса теплоносителя, необходимая для восполнения потерь его за счет испарения в течении всего срока работы аппарата на орбите. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии со сравниваемыми данными. Для полной системы ЖКР с постоянной энергией излучения подтверждается исходное предположение: чем меньше капли, тем легче излучатель.

На рис. 12 показано влияние оптической толщины капельного листа на его массу и на массу потерь теплоносителя за счет испарения. Расчет был выполнен для сопел диаметром 25 мкм, что соответствует диаметру капли примерно 45 мкм. На рисунке нанесена расчетная точка Брукнера для 50 мкм, небольшое различие в результатах объясняется различием диаметров капель.

Потери массы за счет испарения необходимо рассчитывать по эффективной температуре. Так при $\alpha = 3$ потери массы за счет испарения по эффективной температуре $T_e = 492$ К составляют 241 кг, в то время как расчет по максимальной температуре $T_0 = 523$ К эта величина возрастает до 310 кг, т.е. более чем на порядок, и тем самым делает невозможным использование ЖКР.

Полученные результаты экспериментального исследования и данные расчета указывают на большие потенциальные возможности ЖКР.

При создании капельных теплообменных аппаратов стремятся получить наилучшие массогабаритные и массоэнергетические характеристики - с этой целью производится их оптимизация.

При проведении оптимизации смесительных ТОА очень важным яв-

ляется учет особенностей характерных для их условий работы. Оптимальная конфигурация теплообменника и его соответствующие рабочие характеристики оцениваются путем варьирования скорости выпрыска капель, скорости ввода (вывода) газа, размеров капель и разности температур сред на входе.

Известно, что для сравнения эффективности теплообменников, используемых в транспортной энергетике, нельзя применять к.п.д. для традиционных теплообменников, т.к. в нем не учитывается его масса. В работе для этих целей предлагается использовать удельную эффективную мощность поверхности теплообмена A_z , кг⁻¹:

$$A_z = \frac{6 C_K w_K^2 \rho |T'_K - T''_K|}{\pi L C_p \rho w d_K^3 n_{c,fo} |T'_K - T|} = \frac{V \rho |T'_K - T''_K|}{M_{KL} |T'_K - T''_K|} \quad (21)$$

где параметры без индекса внизу относятся к газу.

Для оценки характеристик смесительных теплообменников был рассчитан низкотемпературный прямоточный теплообменник. Рабочим газом был воздух, а рабочей жидкостью масло ТМ-1, которое обладает низким значением давления пара при температурах до 350 К.

На рис. 12 представлена эффективная мощность поверхности теплообмена в зависимости от диаметра и скорости капель при скорости газа на входе в теплообменник $w = 10$ м/с и разности температур рабочих сред на входе 80 К. Нетрудно видеть, что увеличение скорости капель способствует увеличению A_z , ещё существеннее это происходит при уменьшении диаметра капель.

Зависимость эффективной мощности от перепада температур на входе и диаметра капель также указывает на её рост от ΔT и особе-

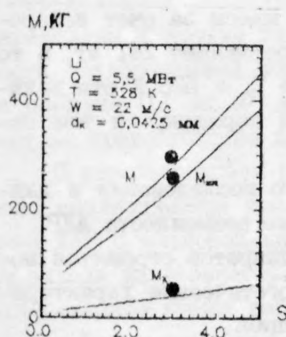


Рис. 12

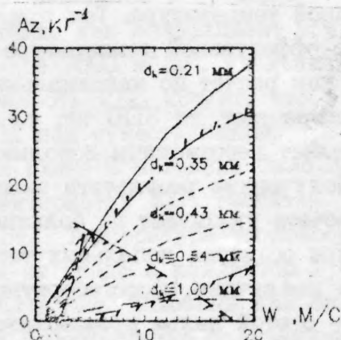


Рис. 13

нно при уменьшении диаметра капле, но при этом нельзя допускать разрушения и уноса капле потоком газа, т.е. необходимо учитывать критические параметры каплеобразования и тогда оптимальные параметры СМ ТОА находятся в ограниченной штрихами области.

При оценке возможностей ЖКР рекомендуется использовать зависимости удельной мощности от величины отводимой мощности излучения, рода теплоносителя и его максимальной температуры. На рис. 14 представлены эти зависимости для лития, олова и ВМ-5. Видно, что данные теплоносители обладают максимальной эффективностью при мощности порядка 5...8 МВт. Однако более предпочтительными в техническом отношении являются литий и ВМ-5. Олово является менее приемлемым теплоносителем для низкотемпературных ЖКР, но для высоких температур порядка 900...1000 К вполне подходящим.

На рис. 15 представлена зависимость удельной мощности от максимальной температуры. Для сравнения дана эксплуатационная характеристика излучателя на тепловых трубах с удельной массой 5 кг/м² и $\epsilon = 0.85$. Нетрудно видеть, что ЖКР на литии и ВМ-5, на которую нанесены результаты данного экспериментального исследования, в 5...10 раз легче излучателя на тепловых трубах при одинаковой отводимой мощности. ЖКР на олове в этом сравнении не столь привлекателен. Тем не менее необходимо отметить, что ЖКР с оловом возвращает теплоноситель в коллектор при температуре значительно меньшей возвратной температуры в тепловых трубах, кроме того расчет массы запаса теплоносителя для восполнения потерь за счет испарения производится по эффективной температуре (T_e), а не по максимальной (T_0), что делает ЖКР сравнимым с ТОА на тепловых трубах, а также, учитывая то, что в ЖКР, работающих на жидких метал-

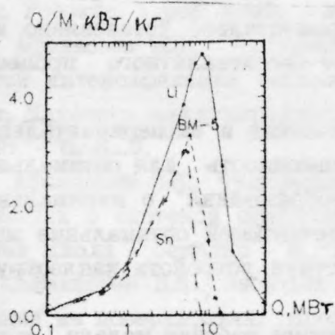


Рис. 14

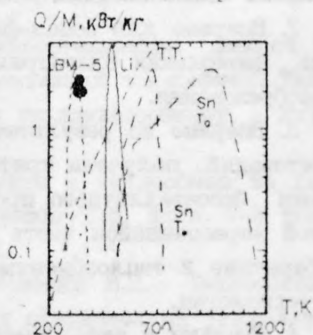


Рис. 15

лах рекомендуется использовать капли размером 30 - 50 мкм, в данном расчете $d_k = 120$ мкм, то ЖР может оказаться существенно легче существующих ТОА, т.е. при выборе типа излучателя необходимо учитывать целый ряд критериев, характерных как для ТОА, так и каплеобразования.

Данные предложенного метода расчета и результаты экспериментального исследования модели ЖР указывают на большие потенциальные возможности ТОА данного типа. Полученные результаты говорят о том, что для таких параметров летательных аппаратов, как суммарная излучаемая энергия, температура излучателя и срок службы последнего, существуют оптимальные величины оптической толщины, размера капель и удельной мощности.

Данную работу необходимо рассматривать, как один из первых шагов в развитии нового научного направления по использованию монодисперсных потоков капель в системах охлаждения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Работа посвящена развитию нового научного направления современной теплоэнергетики - теоретическому и экспериментальному исследованию интенсификации процессов теплообмена путем использования монодисперсных потоков капель. В результате выполненных комплексных научно-исследовательских и конструкторских работ доказана возможность решения важной, актуальной проблемы - создания, на базе существующей технологии, высокоэффективных, компактных капельных теплообменных аппаратов.

2. Впервые для сопел-фильтр экспериментально установлено наличие нескольких благоприятных частот бессателлитного процесса каплеобразования.

3. Впервые по результатам теоретических и экспериментальных исследований получена критериальная зависимость для оптимальной частоты бессателлитного процесса каплеобразования с минимальной длиной неразрывной части струи, обеспечивающей оптимальные массообаритные и теплообменные характеристики устройств каплеструйной технологии.

4. Созданы и экспериментально испытаны рабочие модели капельных теплообменных аппаратов, обеспечивающих получение высоких

значений коэффициентов компактности, удельных масс и мощности теплообменной поверхности, что говорит о больших потенциальных возможностях теплообменников данного типа.

5. Проведены аналитическое и экспериментальное исследования капельных теплообменных аппаратов. Предложены методы их расчета, оптимизации и выбора их основных параметров; методы выбора теплоносителя, его расхода с учетом потерь за счет испарения; методы определения основных параметров капельного потока.

6. Впервые на основании экспериментально полученных и известных данных получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи в монодисперсном потоке капель.

7. Для получения оптимальных параметров каплеобразования в создаваемых генераторах капель необходимо использовать цилиндрические сопла с коническим входом с углом раскрытия в пределах $70^\circ \dots 120^\circ$ с соотношением $\Delta/d = 0,5 \dots 1,5$.

8. Разработаны, созданы и испытаны различные типы генераторов капель. Приведена методика расчета вибросистем и выбора ее активных и пассивных материалов.

Основное содержание диссертации и обоснование выбора направления исследования опубликовано в работах:

1. Афанасьев В.Н. Исследование процессов вынужденного распада струй вязких жидкостей // Тез. док. Российс. аэроз. конф. - Москва, 1993. - С. 101.

2. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Экспериментальное исследование влияния геометрии сопла на процесс каплеобразования // Тез. док. Российс. аэроз. конф. - Москва, 1993. - С. 102.

3. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Самоорганизация вихрей как метод интенсификации теплообмена // Конвективный теплообмен: Тезисы док. Минского международного форума по тепломассообмену. - Минск, 1988. - С. 8...9.

4. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Трение и теплообмен на поверхностях с системой сферических углублений // Тез. докл. 7-я Всесоюзная школа - семинар - М., 1989. - С. 26.

5. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.М., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. - М.: МГТУ, 1990. - 118 с. (Препринт № 1-90).

6. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углубле-

ний на исходно гладкой поверхности/В.Н. Афанасьев, А.И. Леонтьев, Я.П. Чудновский и др. - М.: МТУ, 1991. - 140 с. Препринт № 2-91 часть I. 56 с., часть 2).

7. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение при безотрывном обтекании сферических углублений турбулентным потоком воздуха//Вест. МТУ. Машиностроение. - 1991. - № 4. - С. 15...25.

8. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П., Кудрявцев Н.А. Некоторые результаты исследования обтекания цилиндрических и сферических углублений//Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тез. док. 4-й Всес. семин. - Алушта, 1991. - С. 46.

9. Экспериментальное исследование трения и теплообмена при поперечном обтекании цилиндрической впадины/В.Н. Афанасьев, В.Ю. Веселкин, А.П. Скибин и др.//8 - я Всесоюзная школа - семинар, - М., МВТУ, 1991. - С. 27.

10. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена формой поверхности нагрева//Актуальные проблемы фундаментальных наук: Тез. докл. Международной научно-технической конференции. - Москва, 1991. - С. II...13.

11. Afanasiev V.N., Chudnovsky J.P. Heat transfer and friction on surfaces contoured by spherical depressions//Heat Transfer Research. - 1992. - v. 24, n. 1. - P. 24...105.

12. Экспериментальные исследования течения в одиночных вмянках на исходно гладкой поверхности теплообмена/В.Н. Афанасьев, В.Ю. Веселкин, А.П. Скибин и др.//Конвективный теплообмен: Тез. докл. Минского международного форума по тепло-массообмену. - Минск, 1992. - С. 149.

13. Афанасьев В.Н., Роганов П.С., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхностях с регулярным рельефом сферических вогнутостей/ИФЖ. - 1992. - Т. 63. № 1. - С. 23...27.

14. Афанасьев В.Н. Экспериментальное исследование процессов каплеобразования при вынужденном распаде вязкой жидкости//Науч. тр. МГУЛ. - 1993. - Вып. № 259. - С. 49...62.

15. Turbulent Flow Friction and Heat Transfer Characteristics for Spherical Cavities on a Flat Plate. V.N. Afanasiev, J.P. Chudnovsky, A.I. Leontiev, P.S. Roganov//ETP Science - 1993.- v.7, № 1. - P. 1...8.

16. Afanasiev V.N., Chudnovsky J.P., Leontiev A.I. Physical mechanisms of vortex heat transfer enhancement//Vortices and heat transfer: Proceedings of the EURO THERM seminar. - 1993. - No.31.

Bochum (Germany). - 46 p.

17. Measurement and numerical simulation of vortex turbulent flow and heat transfer in spherical cavity/V.N. Afanasiev, J.P. Chudnovsky, S.A. Isaev, A.I. Leontiev, V.V. Bugnov, V.B. Harchenko//Refined flow modelling and turbulence measurements/Proc. 5th Int. Symposium. - Paris, 1993. - 10 p.

18. Afanasiev V.N., Chudnovsky J.P., Leontiev A.I., Experimental study of vortex heat transfer enhancement mechanisms//Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics: Proc. 3rd World Conference. - Honolulu (Hawaii, USA), 1993. - V.I. - P. 568...576.

19. Afanasiev V.N., Chudnovsky J.P., Roganov P.S. Heat Transfer Processes in a Turbulent Flow Along Regular Reliefs of Spherical Concavities//Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 1993. - V. 63. No. 1. - P. 668...672.

20. Termohydraulics of flow over isolated depressions (pits, grooves) in a smooth wall//V.N. Afanasiev, J.P. Chudnovsky, A.I. Leontiev, A.P. Skibin, V.U. Veselkin/Heat transfer research. - 1993. - Vol. 26. No. 1. - P. 22...56.

21. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Экспериментальное исследование структуры течения в одиночной впадине//Вестник МГТУ, Машиностроение. - 1993. - № 1. - С. 85...95.

22. Афанасьев В.Н. Исследование процессов вынужденного распада струй вязких жидкостей//Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1994. - № 10 - 12. - С. 56...62.

23. Афанасьев В.Н., Чудновский Я.П. Экспериментальное исследование влияния геометрии сопла на процесс каплеобразования//Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1994. - № 2. - С. 92...100.

24. Афанасьев В.Н. Оптимальная частота вынужденного распада жидких струй//Вест. МГТУ. Машиностроение. - 1995. - № 4. - С. 76...81.

25. Afanasiev V.N. Droplet heat exchanger//International Symposium heat transfer enhancement in power machinery. - Moscow, 1995. - Part I. - P. 69...72.

26. Hydrodynamics and heat transfer in the case of streamlining of plate surfaces with hemispheric cavities//V.N. Afanasiev, J.P. Chudnovsky, A.P. Kozlov, A.V. Schukin, R.S. Agachev/International Symposium heat transfer enhancement in power machinery. - Moscow, 1995. - Part I. - P. 87...90.

27. Афанасьев В.Н. Смешивающий теплообменник // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1996. - № 7 - 9. - С. 43...48.
28. Афанасьев В.Н. Теплообмен в монодисперсном потоке // Тез. докл. научно-технич. конф. посв. 165 - летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. - Москва, 1996. - Ч. I. - С. 123.
29. Афанасьев В.Н. Высокоэффективный смешивающий теплообменник типа капля-газ // Тез. докл. 10 Всероссийской межвузовской научно-технич. конф. посв. 150 - летию Н.Е. Жуковского. - Москва, 1996. - С. 82...83.
30. Афанасьев В.Н., Захаров А.О. Расчет смешивающих теплообменных аппаратов // Вестник МГТУ. Машиностр. - 1997. - № 3. - С. 39...47.
31. Афанасьев В.Н. О некоторых особенностях капельных потоков // ТВТ. - 1998. - Т. 36, № I. - С. 94...101.
- 31a. Afanas'ev V.N. Some Specific Features of Droplet Flows // High Temperature. - 1998. - Vol. 36, № I. - P. 90...97.
32. Афанасьев В.Н. Системы охлаждения с монодисперсными потоками капель // Тез. докл. Международной научной конф. // Ракетно-космическая техника. - Москва, 1998. - С. 147.