ФГБОУ ВПО НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ» ИНСТИТУТ ТЕПЛОВОЙ И АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи 1 ise

ЭЛЬБУЗ МУСТАФА АЛИ МУСТАФА АЛИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ И КИПЕНИИ В ПРОСТЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МОНОДИСПЕРСНЫХ МИКРОСФЕР И МЕЗОТРУБОК

Специальность - 05.04.03

Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения Специальность – 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

> диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> > Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Дмитриев Александр Сергеевич

MOCKBA 2015

1

Работа выполнена на кафедре низких температур Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Дмитриев Александр Сергеевич			
Официальные оппоненты:	Деревич Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»			
	Ивочкин Юрий Петрович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией теплообмена в ядерных энергетических установках ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН»			
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»			

Защита диссертации состоится 5 июня 2015 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, корп. Т, кафедра Инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина, ауд. Т-206.

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

Автореферат разослан « *З* » апреля 2015 года.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения, просим выслать по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.157.04 к.т.н.

ДА.К. Ястребов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка перспективных технологий жизнеобеспечения, конверсии энергии, в частности, солнечной, а также сохранения и управления водными ресурсами, требует изучения различных аспектов тепломассообмена при испарении и кипении свободных объемов жидкости. Как правило, в новых разработках и технологиях участвуют различные мезоскопические структуры (микросферы, мезотрубки, мезоскопическая гранулированная среда и т.п.), размер отдельных компонент которых от сотен нанометров до сотен микрометров. Часто введение такой мезоскопической среды заметно меняет свойства системы, в частности, характеристики тепломассообменных процессов. Настоящая работа посвящена процессам тепломассообмена при испарении, кипении и конвективного тепломассообмена различных жидкостей в мезоскопической структуре микросфер и мезотрубок.

Несмотря на значительное число исследований в указанных областях (группы Спарроу, Боуэра и Сейлора, Уварова, Селаты и др.), имеется ряд важных вопросов, которые изучены недостаточно подробно. В первую очередь речь идет об испарении со свободной поверхности ограниченного объема жидкости. Экспериментальному изучению и теоретическому обоснованию процессов испарения в этой ситуации уделено недостаточное внимание. В частности, кривые испарения со свободной поверхности относятся в основном к неограниченным поверхностям (озера, моря, океан), а теоретическая интерпретация связана с построением полуэмпирических соотношений, в которые входят средняя температура жидкости, средняя температура и влажность воздуха, средняя скорость продольного (вдоль поверхности жидкости) ветра. Даже в этом случае, нет удовлетворительного согласия между опытом и моделями, не говоря уже о физической интерпретации и физических механизмах процессов испарения. Помимо этого, возникновение необходимости изучения испарения жидкости из И гранулированных сред приводит К новым пористых задачам исследованию процессов испарения при наличии гранулированной фаза. Полученные в последние годы результаты показали, что в этой области еще много неизвестных эффектов и не до конца изученных закономерностей.

Изучение интенсивных процессов испарения со свободной границы, особенно при наличии мезоскопической гранулированной среды, приводит при высоких тепловых нагрузках (например, при нагреве снизу) к режиму испарения с образованием паровой (или газовой) фазы, что приводит к своеобразному режиму кипения в гранулированной среде (или, псевдокипения, в случае генерации пузырьков растворенного в жидкости газа).

Большой научный и прикладной интерес имеется также в изучении теплообмена в тонких мезоскопических трубках, которые могут являться элементами микротеплообменников для разного рода устройств в системах жизнеобеспечения. Некоторые вопросы теплообмена в таких мезотрубках изучены недостаточно, так что экспериментальное исследование тепло-

обмена и построение корреляций числа Нуссельта как функция числа Рейнольдса с поправками на безразмерный диаметр мезотрубок представляется актуальной.

Все перечисленные проблемы являются также актуальными для практических применений, связанных с проблемами охлаждения зданий методами испарительного охлаждения, в системах конверсии солнечной энергии и системах получения питьевой воды (системы опреснения).

Цель работы. Исследование процессов испарения и кипения в системах со свободными границами, в мезоскопической среде микросфер, а также однофазного теплообмена в мезотрубках.

Основные задачи исследования:

1. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования тепломассообмена при испарении со свободных поверхностей, также в мезоструктурах микросфер и мезотрубок.

2. Изучение процессов испарения со свободных поверхностей сосудов, выполненных из пробирок или чашек Петри, при вариации температуры нагревателя, влажности окружающей среды, влиянии геометрии ограждающих испарительный объем дополнительных контейнеров, влияния типа жидкостей (дистиллированная вода, спирт и изооктан). Изучение влияния мезоструктуры микросфер на скорость испарения со свободных поверхностей.

3. Получение корреляций экспериментальных данных и основных зависимостей для испарение со свободных поверхностей; представление новых корреляций для числа Шервуда как функции числа Рэлея.

4. Проведение компьютерного моделирования процессов испарения, выявление роли конвекции в паровоздушной смеси и ее роли для скорости испарения.

5. Исследование нового режима пузырькового кипения в мезоструктуре микросфер, связанного с ролью динамической твердой фазы (микросфер) - режима «прыгающих» пузырей. Получение основных зависимостей для определение границ такого кипения, выявление основных особенностей в виде «прыгающих» пузырей.

6. Исследования однофазного теплообмена в наборе параллельных мезотрубок; представление корреляций для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок.

7. Анализ эффективности некоторых систем с мезоструктурами на примере испарительного охлаждения с использованием полученных в работе корреляций и зависимостей.

Методы исследования и достоверность полученных результатов:

Методика исследования состояла в разработке и создании экспериментальных установок для изучения процессов испарения и кипения в системах со свободными границами, в мезоскопической среде микросфер, а также однофазного теплообмена в мезотрубках, проведении исследований и получения корреляций, разработке и расчете моделей процессов, оценке использования полученных результатов на практике. Достоверность результатов исследований обусловлена использованием современных методов измерений, оценками ошибок полученных результатов, сравнением результатов с имеющимися данными и корреляциями других исследователей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные установки для исследования тепломассообмена при испарении со свободных поверхностей, также в мезоструктурах микросфер и мезотрубок.

2. Экспериментальные данные для скоростей испарения при малых высотах слоя жидкости и построение корреляционных зависимостей для чисел Шервуда как функции чисел Рэлея $Sh = B \cdot Ra^m$ для этих режимов, сравнение с имеющимися данными и корреляциями других исследователей.

3. Влияние мезоскопической среды в виде микросфер на скорости испарения (влияние размеров микросфер, окружающих контейнеров, типа жидкостей (вода, спирт, изооктан)), скорости испарения при непрерывном движении фронта испарения в жидкости и мезоскопической среде.

4. Новый эффект (режим) пузырькового кипения в недогретой жидкости со свободной поверхностью при наличии микросфер, как динамической твердой фазы, названный «режимом прыгающих пузырей», установление основных закономерностей и построение моделей отдельных механизмов явления.

5. Изучение теплообмена в наборе параллельных мезотрубок и новые корреляции для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок, как основы для инженерных расчетов теплообмена в мезоскопических теплообменниках.

6. Оценки применимости полученных закономерностей для целей практического применения в технологиях жизнеобеспечения (испарительное охлаждение) и конверсии солнечной энергии.

Научная новизна работы

1. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования тепломассообмена при испарении со свободных поверхностей, также в мезоструктурах микросфер и мезотрубок.

2. Получение экспериментальных данных для скоростей испарения при малых высотах слоя жидкости и области сравнительно малых чисел Рэлея – от $10^4 < Ra < 10^6$, в которой имеют место ламинарный и переходный режимы естественной конвекции. Получение зависимости чисел Шервуда от чисел Рэлея для этих режимов $Sh = B \cdot Ra^m$; сравнение с имеющимися данными и корреляциями других исследователей.

3. Изучение влияния мезоскопической среды в виде микросфер на скорости испарения.

4. Впервые обнаружен и исследован новый эффект пузырькового кипения в недогретой жидкости со свободной поверхность, названный «режимом прыгающих пузырей».

5. Исследования теплообмена в системе параллельных мезотрубок и корреляции для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок.

Практическая значимость работы

1. Разработаны экспериментальные методики и установки для изучения тепломассообмена в мезоскопической среде из микросфер и мезотрубок.

2. Получены новые экспериментальные данные и корреляции как зависимости числа Шервуда от числа Рейнольдса для испарения со свободных поверхностей жидкостей и объемов, включающих мезоско-пическую среду Практическая ценность (микросферы). этих результатов состоит возможности создания инженерных соотношений для расчета скоростей также оценки эффективности целом ряде испарения. а В систем жизнеобеспечения, конверсии энергии, сохранения природных водных ресурсов и.т.п.

3. Впервые обнаружен и исследован новый эффект пузырькового кипения недогретой жидкости в форме «прыгающих пузырей». Практическая ценность результатов состоит в возможности использования указанного эффекта при управлении процессами тепломассообмена в системах с кипением при наличии твердой динамической фазы.

4. Впервые проведены исследования теплообмена в теплообменнике на основе набора параллельных мезотрубок и впервые предложены корреляции для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок, которые являются основой для инженерных расчетов теплообмена в мезоскопических теплообменниках.

<u>Личный вклад автора:</u>

Личный вклад автора для достижения полученных результатов заключается в следующем:

а) Разработка и создание экспериментальных установок для исследования тепломассообмена в мезоструктурах микросфер и мезотрубок.

б). Экспериментальные данные для скоростей испарения и зависимостей числа Шервуда от числа Рэлея для испарения из ограниченных объемов жидкости со свободной границей для воды, изооктана и спирта.

в). Экспериментальные данные по влиянию мезоскопической среды в виде микросфер на скорости испарения (размеров микросфер, окружающих контейнеров, типа жидкостей; данные по зависимостям числа Шервуда от числа Рэлея).

г). Обнаружение и исследование нового эффекта пузырькового кипения в недогретой жидкости со свободной поверхностью и мезоструктурой в виде микросфер, названный «режимом прыгающих пузырей

д). Экспериментальные данные по однофазному теплообмену в параллельных мезотрубках; получение впервые корреляций для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок.

<u>Апробация работы</u>

Основные положения результаты диссертационной работы И докладывались на конференциях: VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике, 12-14 ноября 2013г. Екатеринбург, УрФУ; 20-я Международная НТК студентов и аспирантов. Радиотехника, электроника и энергетика. 27–28 февраля 2014 г.; 7th Conference of the International Marangoni Association, June 23-26, 2014, Vienna University of Technology; Шестая конференция теплообмену Российская национальная по (PHKT-6); Всероссийская конференция XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения С.С.Кутателадзе. 17-19 ноября 2014г. Новосибирск; 21-я НТК студентов и аспирантов. Радиотехника, электроника и энергетика. 26-27 февраля 2015 г.

<u>Публикации</u>

Основные содержание диссертации изложены в 3 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК, а также 8 в других рецензируемых журналах, сборниках трудов и тезисах международных и российских конференций.

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 114 иллюстраций, 6 таблиц. Список литературы содержит 230 наименований.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель и задачи исследований, выделены научная новизна работы и практическая значимость исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора исследования.

В главе 1 дан обзор современного состояния проблем испарения и кипения в системах со свободными границами, в мезоскопической среде микросфер, а также однофазного теплообмена в мезотрубках. Проанализированы процессы конвективного, испарительного тепломассообмена и кипения в некоторых энергетических системах и системах охлаждения, дан анализ испарительного охлаждения обеспечения В системах жизнедеятельности, проведен обзор состояния проблемы однофазных теплообменников на основе мезотрубок (примеры представлены на рис.1: принципиальные схемы получения пресной воды на основе солнечного излучения (слева) и конверсии солнечного излучения (справа), поглощаемого мезоструктурой микросфер С использованием теплообменников на мезотрубках).

В главе 1 также рассмотрены вопросы тепломассообмена в гранулированных (пористых) средах, особенности испарения со свободных поверхностей жидкости, тепломассообмен при испарении жидкости в парогазовую среду. Кратко рассмотрен вопрос о кипении в мезоскопических

гранулированных средах и показано, что для динамической твердой фазы, когда она находится в движении, практически не проводились исследования процессов кипения. В заключении рассмотрены цели и задачи исследований.

В главе 2 рассмотрены вопросы испарения жидкостей из сосудов различной геометрии в различных режимах с изменяющимися внешними условиями (температура нагревателя, влажность окружающей среды, ограждающие сосуды контейнеры и т.д.). В разделе приведены постановки задач, принципиальные схемы и методики измерений. Для экспериментов создан экспериментальный стенд (рис.2).

Тепловым источников для изменения температуры в контейнере служил нагреватель ES-HA3040 (2.2 кВт) с регулируемой температурой поверхности (материал – нержавеющая сталь). Для измерения массы испаряющейся жидкости применялись электронные весы VIC-210d2 с точностью 0.01 г (рис.2.2б); в качестве сосудов с рабочими жидкостями использовались пробирки и чашки Петри диаметром 93 мм, а в качестве ограждающих поверхностей (для изменения условий влияния конвекции в окружающей среде) – стеклянные трубы с внутренними и внешними диаметрами 19 и 21 см.



Рис.1. Принципиальные схемы получения пресной воды на основе солнечного излучения (слева) и конверсии солнечного излучения (справа), поглощаемого мезоструктурой микросфер с использованием теплообменников на мезотрубках

Для температуры бесконтактный измерения использовались инфракрасный термометр и контактные термопарные блоки. Для измерения температуры внутри чашек Петри применялась термопара, прикрепленная к держателю микрометрическим винтом (рис.1); термопары были присоединены к аналоговому модулю МВ110-224.8А. Для визуализации некоторых процессов использовался обычный цифровой фотоаппарат вместе с оптическим микроскопом Motic. Рабочая температура в процессе изучения скоростей испарения поддерживалась всегда равной температуре насыщения при атмосферном давлении, чтобы избежать кипения.

Были проведены две серии опытов при атмосферном давлении. Первая серия - свободное испарение дистиллированной воды, спирта и изооктана из пробирок, вторая серия - испарение дистиллированной воды, спирта и изооктана из чашек Петри. Все эксперименты проводились при атмосферном давлении и температурах 60,70 и 80°С. Измерялась масса испарившейся жидкости весовым способом, температура жидкости и парогазовой смеси. Кроме того, как указывалось выше, для учета влияния конвективных потоков во внешней среде использовались цилиндрические контейнеры различного диаметра, внутри которых и проводились эксперименты для измерения скорости испарения. Получены следующие результаты.

А. Скорости испарения различных рабочих жидкостей из пробирок различных рабочих жидкостей - дистиллированная вода, спирт, изооктан из пробирок. В качестве примера, на рис.3 (слева) приведены кривые скоростей испарения (зависимости массы испарившейся жидкости от времени) различных жидкостей при изменении температуры (слева – испарение спирта (индекс s), изооктана (индекс i) и воды (индекс w); числа после букв означают температуру подложки).





Рис.2. Экспериментальный стенд для исследования процессов испарения (а – схема установки, б – фото стенда)

Б. Скорости испарения различных рабочих жидкостей из чашек Петри внутри различных контейнеров. Кривые скорости испарения дистиллированной воды из чашки Петри представлены на рис.3 (справа) в виде зависимости массы жидкости от времени для трех случаев: в отсутствие контейнера, с контейнерами диаметром 15 см и 20 см (для T=80°C). В случае присутствия контейнера скорость испарения воды увеличивается. При этом с ростом температуры нагревателя роль окружающих контейнеров растет. Последнее подтверждается прямым сравнением скоростей испарения со свободной поверхности в чашках Петри при различных размерах контейнеров и при различных температурах (рис.4, слева). Это означает, что конвективные потоки заметно влияют на скорость испарения, что должно учитываться при расчете испарения даже с плоских поверхностей.



Рис.3. Зависимости скорости испарения из пробирок (слева) и дистиллированной воды из чашки Петри (справа)

Зависимости скоростей испарения от температуры и влажности окружающей среды для случаев с контейнером и без него показаны на рис.4 (справа). Нетрудно видеть, что самая низкая скорость испарения отвечает полностью свободной поверхности (без контейнера). После установления стационарного режима испарения (в нашем случае около 20 минут) наблюдается максимальная скорость испарения при наличии контейнера диаметром 15 см.



Рис.4. Кривые скоростей испарения дистиллированной воды из чашек Петри различного диаметра контейнеров (слева) и влияние температуры и влажности окружающей среды (справа)

А. Мезоскопическая среда из микросфер и ее особенности

В работе проводились также исследования по влиянию мезоскопической среды в виде монодисперсных микросфер (в диапазоне диаметров от 100 до 450 мкм) на скорости испарения из чашек Петри. Установка по исследованию испарения, аналогична приведенной на рис.1, методика измерений аналогична описанной выше.

В настоящей работе мезоскопическая среда представляла собой монодисперсных микросфер различного упакованные слои диаметра, изготовленных, например, из металлического сплава (Pb95%+5%Sb). Монодисперсные микросферы изготавливались по методике вынужденного капиллярного распада струй жидких металлов и сплавов, разработанной в НИУ «МЭИ». Результаты испарения из мезоструктур других материалов микросфер не отличались качественно. На рис.5 (слева) представлен типичный вид мезоструктур на основе монодисперсных металлических микросфер внутри дистиллированной воды для изучения эффектов испарения (материал Pb 95%+5% Sb, диаметр 300 мкм).

Б. Экспериментальные результаты

В экспериментах измерялась масса испарившейся жидкости весовым способом, температура жидкости и парогазовой смеси (термопарами и бесконтактными инфракрасными термометрами), аналогично случаю без микросфер. Эксперименты проводились для различных контейнеров (пробирки, чашки Петри и другие), в различных внешних условиях влажность), содержащих (температура, различные жидкости (дистиллированная вода, спирт, изооктан). Кроме того, как указывалось выше, для учета влияния конвективных потоков во внешней среде использовались цилиндрические контейнеры различного диаметра, внутри которых и проводились эксперименты для измерения скорости испарения. В качестве примера, на рис.5 (в центре) приведены кривые скоростей испарения из пробирок для изооктана и спирта с микросферами и без них. Нетрудно видеть из результатов экспериментов, что имеют место более низкие скорости испарения при наличии микросфер для той же массы и типа жидкости, чем для случая без микросфер.



Рис.5. Типичный вид мезоструктур (слева), сравнение скоростей испарения жидкостей с микросферами и без них из пробирок (в центре) и скорости испарения из чашек Петри для различных жидкостей с микросферами (справа)

На рис.5 (справа) показаны зависимости скоростей испарения из чашек Петри для чистой дистиллированной воды, спирта и изооктана с одним слоем монодисперсных микросфер. Начальная масса различных жидкостей была одинаковой и составляла 20 г, что равнялось массе металлических микросфер. Эксперименты проводились при двух температурах – 60 и 70 ^оС. Хорошо видно из приведенных результатов, что скорости испарения в случае

наличия микросфер ниже, чем для чистой жидкостей при той массе и внешних условий. Несмотря на более высокую теплопроводность микросфер по сравнению с жидкостью, термическое сопротивление слоя микросфер снижает температуру поверхности испарения. Кроме того, образование вихрей внутри жидкости и тепломассообмен при испарении снижаются при наличии микросфер.

Для понимания процентного сокращения скорости испарения из слоев микросфер при увеличении температуры были проведены исследования скоростей испарения из слоев чистой воды и слоев воды с микросферами. Опыты проводились при температурах 60 и 70°С. Как видно из результатов исследований, показанных на рис.6, при наличии слоя микросфер скорость испарения уменьшается примерно на 9% (при 60 °С) и на 16,6% (при 70°С). Таким образом, при увеличении температуры разница скоростей испарения без микросфер и с микросферами растет.



Рис.6. Сравнение скоростей испарения воды из чашек Петри в присутствие и отсутствие микросфер

Особый интерес представляли эксперименты по скорости испарения в случае, когда фронт испарения последовательно находился сначала над слоем жидкости (а), затем касался микросфер (б), а затем испарение происходило внутри слоя микросфер (в) (рис.7). На рис.7 также показано измеренное распределение температуры для воды со многими слоями микросфер при температуре нагревателя 70° С.



Рис.7. Последовательные стадии положения фронта испарения в слое микросфер (а-в) и распределение температуры в слое

На рис.8 показана кривая скорости испарения для случая температуры нагревателя 70^{0} C. В момент времени примерно $t \approx 55$ сек наблюдается изменение наклона кривой скорости испарения. Из результатов видео

наблюдений примерно в этот момент фронт испарения входит внутрь мезоструктуры микросфер. Оценки показывают, что скорость фронта испарения уменьшается в этот момент примерно на 12-15%.



Рис.8. Измеренное распределение температуры для воды со многими слоями микросфер при температуре нагревателя 70°С

В. Критериальные зависимости числа Шервуда от числа Рэлея

Полученные выше экспериментальные данные были пересчитаны для случаев испарения в чистых жидкостях и жидкостях, содержащих монодисперсные микросферы, в виде зависимостей чисел Шервуда от чисел Рэлея (конвекция в паровоздушной среде над зеркалом испарения)

$$Sh = C \cdot Sc^n Ra^m \tag{1}$$

где Sc = v/D - число Шмидта (v - кинематическая вязкость воздуха, D коэффициент диффузии водяного воздухе): пара В безразмерный коэффициент массообмена (число Шервуда) в этом случае есть $Sh = \beta \cdot L/D$, где L - характерный размер системы. Поскольку $\beta = q_m / \Delta \rho_{LS}$, то можно записать $\Delta \rho_{IS} = \rho_{IS}(\overline{T}_S) - \phi \rho_{IS}(T_\infty)$, где $\rho_{IS}(\overline{T}_S), \phi \rho_{IS}(T_\infty)$ - плотности насыщения водяного пара при средней температуре поверхности испарения И окружающего воздуха; относительная температуре ø влажность окружающей среды. Разность плотностей является движущей силой процесса испарения, при этом число Рэлея определяется как $Ra = g\Delta\rho L^3 / \bar{\rho}va_{\tau}$, где g ускорение свободного падения, кинематическая вязкость v, a_{τ} -И температуропроводность воздуха, соответственно, $\Delta \rho = \rho_{\infty} - \rho_{s}$ $(\rho_{\infty}, \rho_{s}$ плотность паровоздушной смеси на поверхности воды и в окружающей среде, соответственно, $\bar{\rho}$ - средняя плотность влажного воздуха. При изучении только системы воздух-вода можно положить Sc ~ const, тогда $Sh = B \cdot Ra^{m}, B = C \cdot Sc^{n}$. Число Шмидта для воды около 0,57, поэтому можно построить зависимости только вида Sh = f(Ra).

На рис.9 представлены зависимости Sh = f(Ra) для испарения воды с микросферами и без микросфер. В таблице 1 проведено сравнение показателей в зависимостях $Sh = B \cdot Ra^m$ для случая без микросфер и с микросферами. Видно, что показатель $m = 0,307 \pm 0,002$, $B = 0,261 \pm 0,003$ - для

случая без микросфер и $m = 0,303 \pm 0,002$, $B = 0,254 \pm 0,003$ - для случая с микросферами.



Рис.9. Сравнение зависимостей чисел Шервуда от чисел Рэлея Sh = f(Ra) для случая испарения из сосуда без микросфер и с микросферами и сравнение с существующими экспериментальными данными

Показатель m в $Sh = B \cdot Ra^m$ выполняется достаточно строго, что говорит, на наш взгляд, о важности роли переходной естественной конвекции в парогазовой среде, поскольку именно этот показатель имеет место в зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для переходного теплообмена (заметим, что в наших экспериментах числа Рэлея достаточно малы для развитой турбулентной естественной конвекции 2,410⁴ < Ra < 1,810⁶ (заметим, что нам неизвестны работы по испарению при таких малых числах Рэлея, в основном, из-за малой глубины сосуда). В случае естественной конвекции на плоской поверхности $Nu = C \cdot Ra^m$, $m \approx 1/3$.

$Sn - D \cdot Na$ в различных экспериментальных работах					
Параметры	В	m	Sc	Диапазон чисел <i>Ra</i>	
Боуер, Сейлор [83]	0,263	0,306	0,57	$9,6.10^{5} < \text{Ra} < 5,7.10^{8}$	
Шарпи, Боэлтер [120]	0,92	0,213	0,57	$10^{6} < \text{Ra} < 4.5 \cdot 10^{7}$	
Боэлтер и др. [121]	0,054	0,241	0,57	$9,3.10^{6} < \text{Ra} < 4,6.10^{8}$	
Наши данные (без микросфер)	0,261±0,003	0,307±0,002	0,57	$2.10^4 < \text{Ra} < 1.6.10^6$	
Наши данные (с микросферами)	0,254±0,003	0,303±0,002	0,57	$2,4.10^4 < \text{Ra} < 1,8.10^6$	

Таблица 1. Сравнение величин, входящих в зависимость числа Шервуда от числа Рэлея $Sh = B \cdot Ra^m$ в различных экспериментальных работах

В работе проведено компьютерное моделирование на базе программного комплекса PHOENICS процессов испарения в условиях, близких экспериментальным. Исходя ИЗ данных к численного моделирования, можно найти средний массовый расход жидкости при испарении в условиях, отвечающим эксперименту. Так, при температуре нагревателя - 70°C, после достижения квазистационарного режима, средняя по времени скорость пара на поверхности - 1,81 мм/сек, средняя по времени температура поверхности - 41,02 °C, что отвечает одному из опытных режимов, в которых при той же температуре нагревателя 70°C, температура поверхности около 42°C, в скорость пара на поверхности – 2,1 мм/сек. Средний массовый расход пара (скорость испарения) для указанного режима в эксперименте больше теоретически рассчитанного примерно на 11%. Более высокая скорость пара на поверхности жидкости в эксперименте связана с более высокой температурой, а последняя обусловлена тем обстоятельством, что конвекция в жидкости, имеющая место в опыте, не учтена в модели моделирования. Понятно, что более активное перемешивание жидкости дает более высокую температуру ее поверхности. В целом указанное различие между результатами опытов и моделированием весьма небольшое и означает применимость использованной модели правильность И трактовки происходящим на опыте процессам. В заключении главы приведены выводы.

В главе 3 проведено изучение нового, обнаруженного впервые автором, режим «прыгающих» пузырей в процессе пузырькового кипения жидкости в мезоскопической структуре монодисперсных или полидисперсных микросфер. Экспериментальное оборудование аналогично показанному на рис.2. Эксперименты проводились в чашках Петри (глава 2) с дистиллированной водой. В качестве мезоскопической среды выбирались микросферы алюминия и сплава свинца различного диаметра. Экспериментально обнаружено, что в отдельных режимах пузырькового кипения наблюдается возникновение режима «прыгающих пузырьков» (jumping pool boiling), не достигающих поверхности недогретой жидкости. При этом пузырьки могут захватывать некоторое число микросфер и подниматься на некоторую высоту, но, не достигнув поверхности, опускаться вместе с микросферами дно контейнера. Характерная на картина процесса представлена на рис.10.



Рис.10. Кипение в режиме «прыгающих» пузырей (вид сверху – слева и вид сбоку – справа)

Отдельные этапы указанного процесса также наблюдаются на рис.11 (здесь показано последовательное положение пузырька, захватившего микросферы). В работе выявлены границы режимов и карта режимов. В таблице 2 показаны сводные данные о режимах «прыгающего кипения».



Рис.11. Последовательное положение пузырька, захватившего микросферы (случай микросфер алюминия)

Материал	Характерные	Примечание	
микросфер	температуры		
Al, ~ 200 мкм		Для более легких микросфер наблюдается	
	$T_{start}^{j} \approx 101, 5 - 103, 0^{\circ}C$	меньше пузырей в режиме «прыгающего»	
	$T_{finish}^{j} \approx 104, 0 - 106, 5^{\circ}C$	кипения, они поднимаются и опускаются	
	$\Delta T = 4 - 6^{\circ} C$	медленнее, хоты температуры начала и	
		окончания режима такого кипения были близки	
Pb95%+Sb5%,		Для более тяжелых микросфер наблюдается	
450 мкм	$T_{start}^{j} \approx 101, 5 - 103, 0^{\circ}C$	больше пузырей в режиме «прыгающего»	
	$T_{finish}^{j} \approx 104, 0 - 106, 5^{\circ}C$	кипения, они поднимаются и опускаются	
	$\Delta T = 4 - 6^0 C$	медленнее, хоты температуры начала и	
		окончания режима такого кипения были близки	
Pb95%+Sb5%,	$T_{start}^{j} \approx 101, 5C$	Начало режима «прыгающего» кипения	
450 мкм			
Pb95%+Sb5%,	$T_{finish}^{j} \approx 106, 0^{0} C$	Окончание режима «прыгающего» кипения и	
450 мкм	v	переход к обычному пузырьковому кипению	
Pb95%+Sb5%,	$T > 106, 50^{\circ}C$	Режим перехода от «прыгающего» кипения к	
450 мкм		обычному пузырьковому	

Таблица 2. Сводные данные о режимах «прыгающего кипения»

Схема режима «прыгающего кипения» показана на рис.12. Здесь хорошо видно, что пузыре, рождаясь на поверхности нагрева, захватывает микросферы, поднимаясь в слое недогретой жидкости, и, не достигая границы раздела опускается снова к поверхности нагрева. Как показали экспериментвы, этот периодический процесс для многих пузырьков с различным числом захваченных микросфер может продолжаться очень длительное время. Физический механизм подобного процесса объяснен в рамках моделей, развитых в данной работе. Механизмом захвата микросфер пузырями являются капиллярные силы на границе жидкость-пар, причем в зависимости от скорости роста пузыря (плотности теплового потока на

нагревателе), пузырь может захватывать определенное число микросфер (в опытах наблюдался захват 55-60 микросфер одним пузырем) (рис.14). Комплекс «пузырь+микросферы» поднимается в недогретой жидкости, охлаждаясь. При этом подъемная сила на некоторой высоте не в состоянии уравновесить вес указанного комплекса и последний опускается. После касания поверхности нагрева, процесс повторяется.



Рис.13. Схема периодического режима «прыгающего кипения»



Рис.14. Комплексы «пузырь+микросферы» (слева) и зависимость теплового потока от температуры стенки (справа)

В работе развита также простая модель теплообмена при «прыгающем» кипении. В области естественной конвекции, которая отвечает в случае микросферами начальной отрыва пузырей стадии С микросферами, теплообмен можно описать классическим законом вида $Nu = B \cdot Ra^m$, где обычно воды имеем $B \approx 1,18$, а величина *m*≈0,125. Расчеты по ДЛЯ формулам и приведенным выше сравнение опытными С данными на рис.14 (справа). Нетрудно представлены видеть, ЧТО В области естественной конвекции жидкость без слоя микросфер и с микросферами ведет себя одинаково (различия в тепловом сопротивлении слоя микросфер, по-видимому, лежат за границей возможностей эксперимента). В области «прыгающего» кипения жидкость без микросфер имеет более высокий коэффициент теплоотдачи, что, по-видимому, обусловлено началом организации центров парообразования (при таких тепловых потоках в системе с микросферами центры парообразования уже весьма активны). В этом случае для случая с микросферами наблюдается меньшее значение коэффициента теплоотдачи. Нами установлено, что соотношение вида $Nu = B \cdot Ra^m$ имеет значение $B \approx 1,13$, т.е. несколько ниже, чем для обычной конвекции.

В главе 4 экспериментально исследован однофазный теплообмен при вынужденном течении устойчивого потока воды внутри мезотрубок. Экспериментальный стенд и опытный участок показаны на рис.15. Основная задача исследований – получений новых корреляций для однофазного теплообмена в мезоканалах с учетом влияния их диаметра. В работе исследовались мезотрубки с внутренними диаметрами 0,25, 0,35, 0,52 и 0,7 мм, рабочее тело вода, нагрев осуществлялся паром постоянной температуры.



Рис.15. Экспериментальный стенд и опытный участок

В результате анализа и обработки полученных опытных данных, построена эмпирическая корреляция зависимости числа Нуссельта Nu как функции числа Гретца G_z для различных относительных диаметров D/D_0 в виде $Nu/Gz^{0.45} = 2, 4(D/D_0)^{0.521}$, где опорный диаметр равен $D_0 = 1$ мм.



Рис.16. Опытные данными и полученная корреляция для приведенного числа Нуссельта

Сравнение такой корреляции с опытными данными, полученными в работе, приведено на рис.16.

Полученные в работе новые эмпирические корреляции зависимости числа Нуссельта и числа Гретца от приведенного диаметра, весьма хорошо совпадают с нашими экспериментальными данными в исследованных рабочих диапазонах.

B главе 5 приведены оценки параметров И эффективности использования полученных в работе соотношений для некоторых систем солнечного излучения испарительного конверсии И охлаждения С мезоскопической среды, применением также указаны a направления использования и методика расчета систем с мезотрубками.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и созданы экспериментальные установки для исследования тепломассообмена при испарении со свободных поверхностей, также в мезоструктурах микросфер и мезотрубок.

2. Получены экспериментальные данные для скоростей испарения и зависимостей числа Шервуда от числа Рэлея для испарения из ограниченных объемов жидкости со свободной границей для различных внешних условий и типов сосудов и жидкостей.

3. Впервые изучено влияние мезоскопической среды в виде микросфер на скорости испарения, показано влияние размеров микросфер и их материала; выявлено влияние окружающих контейнеров на скорости испарения, а также типа жидкостей (вода, спирт, изооктан).

4. Впервые обнаружен и исследован новый эффект пузырькового кипения в недогретой жидкости со свободной поверхность, названный «режимом прыгающих пузырей». Отмечено, что такой эффект, хотя и имеет узкую область на диаграмме (кривой кипения) – зависимости теплового потока от разности температур, устойчиво повторяется не только в режиме паровых пузырей, но также и в режиме газовых пузырей (псевдопленочное кипение).

5. Впервые проведены исследования теплообмена в теплообменнике на основе набора параллельных мезотрубок и впервые предложены корреляции для числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и относительного диаметра мезотрубок, которые являются основой для инженерных расчетов теплообмена в мезоскопических теплообменниках.

Основные публикации автора:

1. А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз. О новом режиме пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (эффект прыгающих пузырей). Письма в Журнал технической физики, т.41, вып.6, с.67-72, 2015.

2. А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз. Исследование пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (режим

«прыгающих» пузырей). Естественные и технические науки, № 1(79), 2015, С. 12-15.

3. L. Rabie, H. Mostafa, G. Sultan, M.A. El-Booz. Forced Convection Heat Transfer in Circular Meso-Tubes. Int. J. Trans. Phenomena, Vol. 9, pp. 271– 286. 2007.

4. А.С. Дмитриев, Эль Буз Мустафа Али, Романов А.С. Особенности тепломассообмена при испарении и кипении ограниченных объемов жидкости на мезоскопических поверхностях. Труды VIII Всероссийского семинара вузов по теплофизике и энергетике, 12-14 ноября 2013г., Екатеринбург, УрФУ.

5. А.С. Дмитриев, М.А. ЭльБуз. Тепловые процессы в мезоскопических структурах с испарением. 20-я Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. Радиотехника, электроника и энергетика. 27 - 28 февраля 2014 г., М. Изд. Дом МЭИ. 2014. С.77.

6. A.S. Dmitriev, M. A. El Bouz, P. G. Makarov. Jumping pool boiling into mesoscopic structures of monodispersed microspheres. 7th Conference of the International Marangoni Association, June 23–26, 2014, Vienna University of Technology.

7. A. F. Ginevskiy, A.S.Dmitriev, M. A. El Bouz. Evaporation rate from mesoscopic structures of monodispersed microspheres: experimental and computer simulations. 7th Conference of the International Marangoni Association, June 23–26, 2014, Vienna University of Technology.

8. А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз. Об особенностях эффектов пузырькового кипения в мезоструктурах микросфер (эффект прыгающих пузырей). Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6), 27-31 октября 2014 года, Москва.

9. А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз. О кипении жидкостей на плоских поверхностях, покрытых слоем монодисперсных металлических микросфер, в режиме «прыгающих пузырей». Всероссийская конференция XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения С.С.Кутателадзе. 17-19 ноября 2014г. Новосибирск, с.180.

10. П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз, А.С. Дмитриев. Кипение в режиме «прыгающих пузырей»: механизмы, теплообмен, гидродинамика. 21-я Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. Радиотехника, электроника и энергетика. 26 - 27 февраля 2015 г., М. Изд. Дом МЭИ. 2015. С.365.

11. П.Г. Макаров, М.А. Эльбуз, А.С. Дмитриев. Особенности кипения жидкостей, содержащих монодисперсные микросферы, в режиме «прыгающих пузырей». Ш Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». 10-12 декабря 2013г. МАМИ. М. 2014. с.14-16.