

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Скорость испарения слоя жидкости, движущегося в мини-канале

УДК 532.543:536.423

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Жаравин Захар Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Дмитрий Владимирович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко Аркадий Альбертович	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антоневич Ольга Алексеевна	К.Б.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Гений Владимирович	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Кузнецов Г. В.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Жаравину Захару Евгеньевичу

Тема работы:

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И
 ИСПАРЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№10155/с от 28.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы:

16.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования – тепломассоперенос двухфазных систем. Предмет исследования – зависимости массовой скорости испарения от температуры системы «этанол – воздух», расхода газа и толщины слоя жидкости. Термодинамические параметры на поверхности раздела газа и жидкости.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Анализ научных публикаций по тепломассопереносу в двухфазных потоках, движущихся в миканалах. Разработка методики экспериментальных исследований по изучению процесса испарения неподвижной горизонтальной пленки жидкости (спирта), обтекаемой потоком газа (воздуха). Проведение серии экспериментальных исследований по испарению движущегося слоя жидкости, под действием потока газа. Получение зависимостей массовой скорости испарения от скорости потока газа и толщины слоя жидкости. Разработка методики по определению температуры поверхности слоя жидкости и коэффициента аккомодации. Анализ полученных экспериментальных результатов. Определение погрешностей экспериментальных исследований.
Перечень графического материала	Презентация, _____ слайдов
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент,	Фигурко Аркадий Альбертович

ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Обзор литературы	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.10.2014
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Жаравин Захар Евгеньевич		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

Физика, магистратура

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>	
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики низких температур, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств материалов.
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко

	определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 206 с., 67 рисунков, 31 таблица, 89 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: двухфазные течения, массовая скорость испарения, тепломассоперенос, фазовый переход, конвекция, миниканал.

Объектом исследования является тепломассоперенос двухфазных систем.

Цель работы – экспериментальное определение влияния толщины слоя жидкости, температуры двухфазной системы и расхода газа, движущегося параллельно подвижному слою жидкости, на скорость испарения при условиях формирования устойчивой плоской межфазной поверхности раздела “жидкость-газ”.

В процессе исследования проводились экспериментальные исследования по определению зависимостей массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости, температуры системы «этанол–воздух» и расхода воздуха. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными при неподвижном слое жидкости. Также в работе определялись, температурный перепад на поверхности раздела “этанол–воздух” и коэффициенты аккомодации.

Полученные результаты могут быть использованы для расширения теоретических положений по изучению теплообмена в двухфазных потоках, что в свою очередь будет способствовать повышению эффективности абсорбционного и испарительного оборудования применяемого для сжижения природного газа.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Испарение – это процесс фазового перехода жидкость-пар либо жидкость-воздух при подводе внешнего тепла.

Расклинивающее давление – это термодинамический параметр, характеризующий состояние тонкого слоя жидкости или газа в промежутке между поверхностями тел.

Эффект Марангони – явление переноса вещества вдоль границы раздела двух сред, возникающее вследствие наличия градиента поверхностного натяжения (термокапиллярная конвекция).

Паросодержание – количество сухого пара, содержащегося в 1 кг влажного пара.

Поверхность раздела фаз – граничная поверхность между любыми двумя контактирующими фазами термодинамической системы.

Удельная массовая скорость испарения – определяет массу жидкости, испарившейся с единицы площади за 1 секунду.

Коэффициент теплоотдачи – характеризует интенсивность теплообмена, равен плотности теплового потока при градиенте температур равном единице.

Коэффициент аккомодации – безразмерный параметр, при помощи которого макроскопические характеристики потока молекул газа, отражённых от элемента поверхности тела, выражаются через соответствующие характеристики налетающих молекул.

Случайная погрешность измерений – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Систематическая погрешность измерений – погрешность, изменяющаяся во времени по определённом закону (частным случаем является постоянная погрешность, не изменяющаяся с течением времени).

Обозначения и сокращения

СПГ – сжиженный природный газ;

АВО – аппарат воздушного охлаждения;

ПК – персональный компьютер;

КИП – контрольно – измерительная программа;

PIV метод – метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry);

SWOT анализ – метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: strengths (сильные стороны), weaknesses (слабые стороны), opportunities (возможности) и threats (угрозы);

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

ТБ – техника безопасности;

ТБО – твердые бытовые отходы.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 5962–2013 «Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья»;
2. ГОСТ 6709–72 «Вода дистиллированная»;
3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»;
4. СП 52.13330.2011. «Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23–05–95*»;
5. СНиП 23–05–95*. «Естественное и искусственное освещение»;
6. ГОСТ 12.1.006–84* «СБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;

7. СанПин 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях»;
8. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
9. СНиП 2.04.05–91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»;
10. СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
11. ГОСТ 12.1.045–84 «ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
12. ГОСТ 12.4.124–83 «ССБТ. Средства защиты от статического электричества»;
13. РД 39-22-113–78 «Временные правила защиты от проявлений статического электричества на производственных установках и сооружениях нефтяной и газовой промышленности»;
14. СНиП 3.05.06–85 «Электротехнические устройства»;
15. ГОСТ 1516.3–96 «Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции»;
16. СНиП 2.09.04.77 «Административные и бытовые здания»;
17. ГН 2.2.5.1313–03 «ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны»;
18. ГОСТ 17.4.1.02–83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения»;
19. СанПиН 2.1.7.1038–01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов;
20. СНиП 21–01–97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений»;
21. ГОСТ 12.2.032–78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;
22. СанПиН 2.2.2.542–96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

Оглавление

Введение	12
1.СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	
ТЕПЛОМАССООБМЕНА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ.....	17
1.1. Процессы тепло – и массообмена при испарении пленок жидкости...17	
1.2. Определение коэффициента аккомодации.....42	
1.3. Термокапиллярные эффекты, возникающие в тонких слоях жидкости 45	
Выводы по первой главе	48
2.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ	
НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА .52	
2.1.1. Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента	52
2.1.2. Выбор схемы проведения экспериментальных исследований.....52	
2.1.3. Выбор области изменения основных факторов	53
2.1.4. Методика проведения эксперимента	55
2.2. Описание экспериментальной установки.....65	
2.2.1. Принцип действия экспериментальной установки	65
2.2.2. Рабочий участок.....68	
2.2.3. Контрольно-измерительная система.....70	
2.2.4. Теневая система.....72	
3.АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПОД	
ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА.....	76
3.1. Методика расчета массовой скорости испарения с поверхности слоя жидкости, обдуваемого потоком газа	76
3.2.Свойства рабочей жидкости и газа.....78	
3.3. Зависимости массовой скорости испарения	81
3.3.1 Зависимость массовой скорости испарения от температуры системы “газ-жидкость”	81
3.3.2. Зависимость массовой скорости испарения от средней скорости потока газа	85
3.3.3 Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости ..90	

3.3.4. Сопоставление результатов экспериментальных исследований с результатами полученными при неподвижном слое жидкости.....	94
3.4. Конвекция в горизонтальном подвижном слое жидкости, обтекаемой потоком газа в миниканале	101
3.5. Определение погрешностей эксперимента.....	105
3.5.2. Оценка случайных погрешностей косвенных измерений.....	109
3.6. Расчет температуры поверхности	110
3.7. Расчет коэффициента аккомодации.....	115
Выводы по третьей главе	118
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	121
4.1. SWOT-анализ.....	121
4.2. Экспертная оценка.....	124
4.3. Календарный план	128
4.4. Смета. Бюджет проекта	131
4.5 Ресурсоэффективность	134
4.6 Экономическая эффективность	135
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	139
Введение	139
5.1 Производственная безопасность	140
5.1.1 Вредные физические производственные факторы	140
5.1.2 Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды... ..	146
5.2 Экологическая безопасность	147
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	148
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	149
Список литературы	151
Приложение А.....	160
Приложение Б	179

Введение

Одна из главных тенденций современного развития техники – это миниатюризация устройств. В различных миниразмерных энергетических устройствах осуществляются процессы конденсации и испарения в мини- и микро- каналах. В технологиях энергетической, химической, нефтехимической и горнодобывающей промышленности происходит переход от процессов тепло – и массообмена в большом объеме к процессам в тонких слоях жидкости. Существенно возрастают удельные и объемные плотности теплового потока.

Применение миниканальных технологий существенно повышает эффективность теплообменных устройств. Преимуществами теплообменников с миниканалами, по сравнению с традиционными, являются увеличение поверхности теплообмена на единицу объема, меньшая материалоемкость, а также более высокие коэффициенты теплоотдачи. Малогабаритные теплообменники применимы в технике низких температур, в таких теплообменниках используются течения тонких пленок жидкости.

Изучение процесса испарения тонких слоев жидкости, движущихся совместно с газовым потоком, при локальном нагреве является актуальной задачей механики и теплофизики. Исследования в данной области необходимы для разработки современных методов охлаждения нагреваемых поверхностей в мини – и микросистемах [3]. Интенсивно испаряющиеся пленки жидкости, обтекаемые потоком газа, способны отводить тепловые потоки до 1000 Вт/см^2 [5]. Процессы испарения тонких слоев жидкости лежат в основе технологии сжижения природного газа и применяются в процессах абсорбции, ректификации, выпаривания и охлаждения.

Для осушки природного газа используются абсорбционные, адсорбционные и физические способы. Абсорбентами для осушки природного газа являются ди- и триэтиленгликоли, а адсорбентами – селикагель, алюмогель, активированный боксит и цеолиты. К физическим методам относится вымораживание влаги на насадках и способ низкотемпературной сепарации [59].

Принципиальная схема процесса очистки и осушки природного газа представлена на рисунке 1.

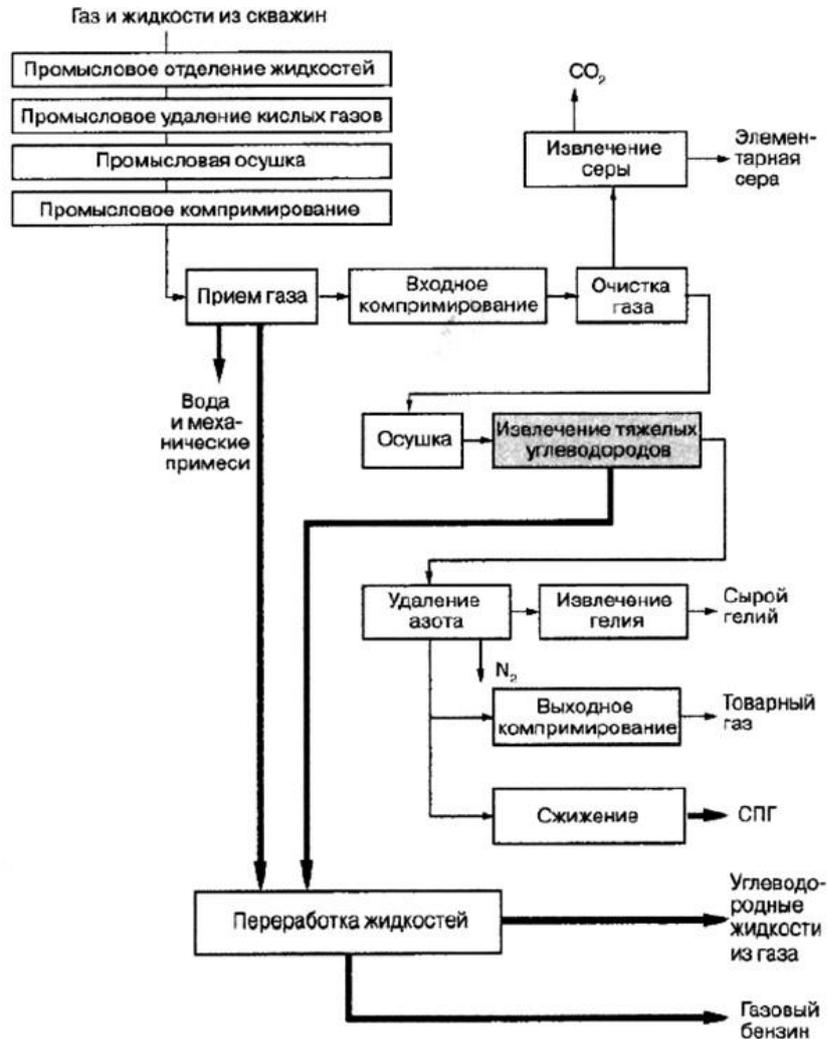


Рисунок 1 – Принципиальная схема очистки и осушки природного газа [59].

Известно, что для осушки природного газа применяется моноэтаноламиновый способ, относящийся к абсорбционным методам. Используя моноэтаноламиновый способ очистки (рис.2) от CO₂ и H₂S, природный газ нуждается в дополнительном увлажнении. Поэтому его осушку проводят после очистки.

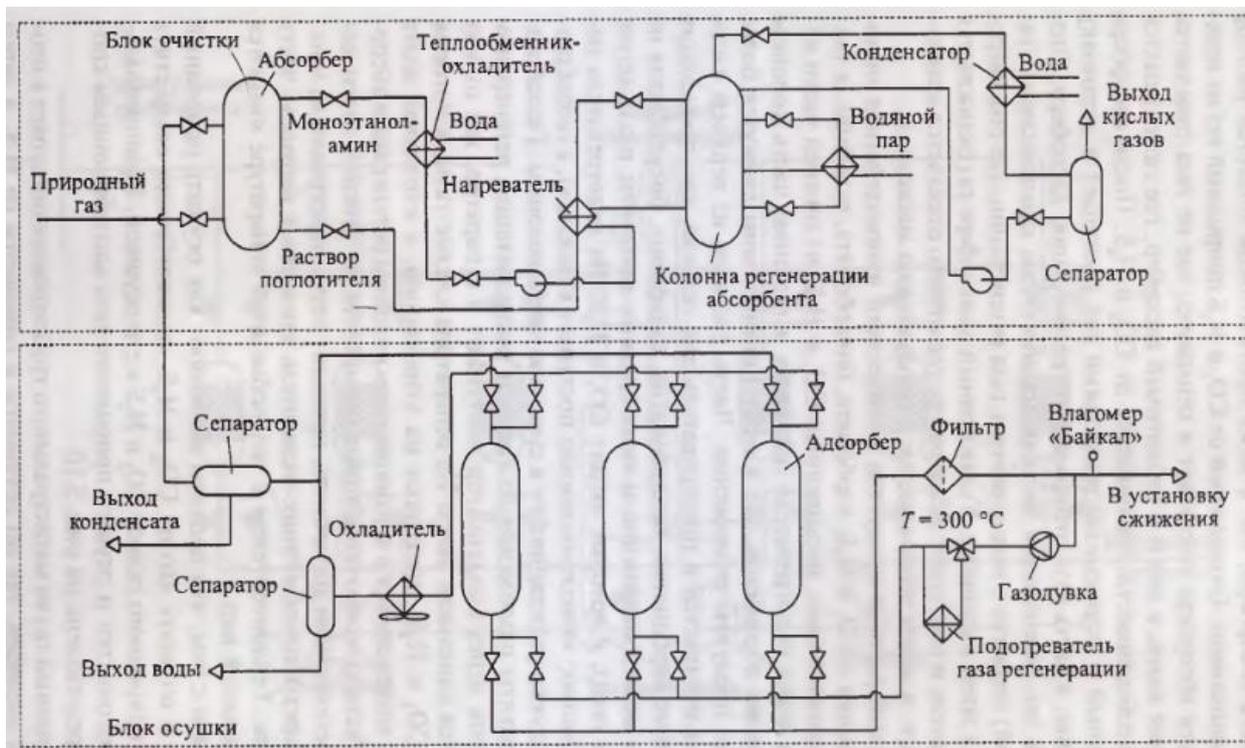


Рисунок 2 – Принципиальная схема очистки природного газа моноэтаноламиновым способом и его адсорбционной осушки [59].

Природный газ из магистрального трубопровода поступает в нижнюю часть абсорбера, где к нему противотоком подается раствор моноэтаноламина. Очищенный от CO_2 и H_2S природный газ из верхней части абсорбера поступает в сепаратор, где от газа отделяется капельная влага, а затем в цеолитовый адсорбер, где газ осушается и при необходимости дочищается от CO_2 и H_2S . После адсорбера очищенный и осушенный природный газ поступает в установку сжижения, а часть газа отбирается на регенерацию адсорбера. Отобранная для регенерации часть природного газа компрессором подается в подогреватель газа регенерации, где она нагревается, а затем подается в адсорбер. Увлажненный в адсорбере газ охлаждается и поступает в сепаратор, где от него отделяется капельная влага, а затем возвращается в магистраль.

При осушке природного газа абсорбционным и низкотемпературным способом осуществляются процессы испарения пленок жидкости, взаимодействующих с потоком газа. Детальное изучение физических процессов

происходящих при испарении тонких слоев жидкости под действием потока газа позволит повысить эффективность процессов осушки природного газа.

Тонкие слои жидкости используются в процессах криосорбции, применяемой в криогенных насосах для создания вакуума и обеспечения сверхнизких температур. В процессах криосорбции на газовых конденсатах используются слои толщиной не более 100 мкм, при этом идеальные условия криосорбции достигаются при толщине слоя сопоставимом с размером поглощаемых молекул, что не достижимо на практике, поэтому, как правило, используют слой газового конденсата толщиной от 20 до 50 мкм. Также минимальная толщина слоя конденсата необходима для того, чтобы разность температур между основанием и поверхностью пленки не превышала 0,01 °С. Быстрота действия криосорбционного насоса зависит от степени покрытия поверхности. Для оптимальной работы насоса необходимо поддерживать минимальную степень покрытия, которая достигается при низком давлении откачки и минимальной толщине слоя конденсата. При этом быстрота действия уменьшается тем сильнее, чем больше толщина слоя конденсата. Основная проблема обеспечения минимальной толщины слоя конденсата состоит в том, что с уменьшением толщины, пленка становится более подвержена разрывам и различного рода неустойчивостям.

При производстве сжиженного природного газа для охлаждения рабочего хладагента, используются аппараты воздушного охлаждения (АВО). Как правило, АВО устанавливаются на крыше завода по сжижению природного газа, занимая значительную площадь. Применение пленочных течений и миниканальных теплообменников для охлаждения хладагентов в АВО позволит существенно повысить холодопроизводительность системы воздушного охлаждения и уменьшить площадь занимаемую данными аппаратами.

Цель работы: экспериментальное определение влияния толщины слоя жидкости, температуры двухфазной системы и расхода газа, движущегося параллельно подвижному слою жидкости, на скорость испарения при условиях

формирования устойчивой плоской межфазной поверхности раздела “жидкость-газ”.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ научных публикаций по тепломассопереносу в двухфазных потоках, движущихся в миниканалах.
2. Разработка методики экспериментальных исследований по изучению процесса испарения неподвижной горизонтальной пленки жидкости (спирта), обтекаемой потоком газа (воздуха).
3. Проведение серии экспериментальных исследований по испарению движущегося слоя жидкости, под действием потока газа.
4. Получение зависимостей массовой скорости испарения от скорости потока газа, толщины слоя жидкости и температуры системы «этанол – воздух».
5. Определение температуры поверхности слоя жидкости и коэффициента аккомодации.
6. Анализ полученных экспериментальных результатов.
7. Определение погрешностей экспериментальных исследований.

Объект исследования – тепломассоперенос двухфазных систем.

Предмет исследования – зависимости массовой скорости испарения от температуры системы «этанол – воздух», расхода газа и толщины слоя жидкости. Термодинамические параметры на поверхности раздела газа и жидкости.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

1.1. Процессы тепло – и массообмена при испарении пленок жидкости

Экспериментально и численно исследовалось [1] влияние касательных и нормальных напряжений, действующих на поверхности пленки, на устойчивость двухфазного потока в миниканале, также в работе изучалось воздействие деформаций и хаотичных структур на процесс теплообмена. В качестве рабочих жидкостей использовались FC – 72 и вода, газа – воздух. Диапазон чисел Рейнольдса при проведении экспериментов для потока жидкости составлял 0,5 – 12 и 0,3 – 30 для потока газа, при температуре 20 – 22 °С. Зафиксировано устойчивое совместное движение пленки жидкости и газа, без образования волн в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Численные расчеты показывают, что при высоких значениях числа Рейнольдса потока газа (до 3000) испарение 10% жидкой фазы приводит к существенному возрастанию количества отводимого тепла от локального источника нагрева. Отмечается, что при высоких скоростях газа плотность теплового потока не оказывает существенного значения на температуру поверхности пленки жидкости, что приводит к снижению интенсивности испарения. Обнаружено, что при высоких значениях чисел Рейнольдса величина критического теплового потока для разрыва пленки превышает в 3 – 5 раз соответствующее значение, для пленки стекающей под влиянием сил гравитации. Установлено, что существенное влияние на процесс теплообмена и разрыв пленки оказывают нормальные и касательные напряжения, возникающие на поверхности слоя жидкости под действием потока газа и термокапиллярных сил.

В работе [2] исследовался процесс испарения двухфазного потока, движущегося в миниканале с локальным источником теплоты. Установлено, что с уменьшением толщины пленки жидкости возрастает скорость выхода теплового пограничного слоя на поверхность жидкости, что приводит к увеличению интенсивности испарения. Также отмечено, что рост средней

скорости потока газа приводит к уменьшению толщины пленки, что в свою очередь увеличивает количество тепла, которое отводится от поверхности нагрева за счет фазового перехода, но тонкие пленки подвержены разрыву. Целью данной работы являлось сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Анализ результатов показал, что расчеты корректно описывают величину максимальной температуры на поверхности слоя жидкости, отличие не превышает 1,2 °С. Приведено распределение температуры на поверхности раздела воды и азота (рис.1.1), а также показан вклад конвекции и испарения на процесс охлаждения локального источника теплоты. Наличие испарения снижает температуру нагревателя на 16 °С. Определено, что максимальная температура на межфазной поверхности находится в конце нагревателя, однако в экспериментальных данных наблюдается смещение максимальной температуры вверх против течения (рис.1.2). Расхождение теоретических и экспериментальных исследований объясняется тем, что при теоретических расчетах поддерживалось условие $q = \text{const}$, при проведении экспериментов поддерживать данное условие не представлялось возможным. Также различия между теоретическими и экспериментальными результатами связано с существенным уменьшением толщины пленки в конце нагревателя при проведении эксперимента, что увеличивает интенсивность испарения. Проведенные исследования показывают, что толщина пленки жидкости влияет на интенсивность испарения. Авторами предположено существование критической толщины слоя жидкости, при которой возникают неравновесные процессы.

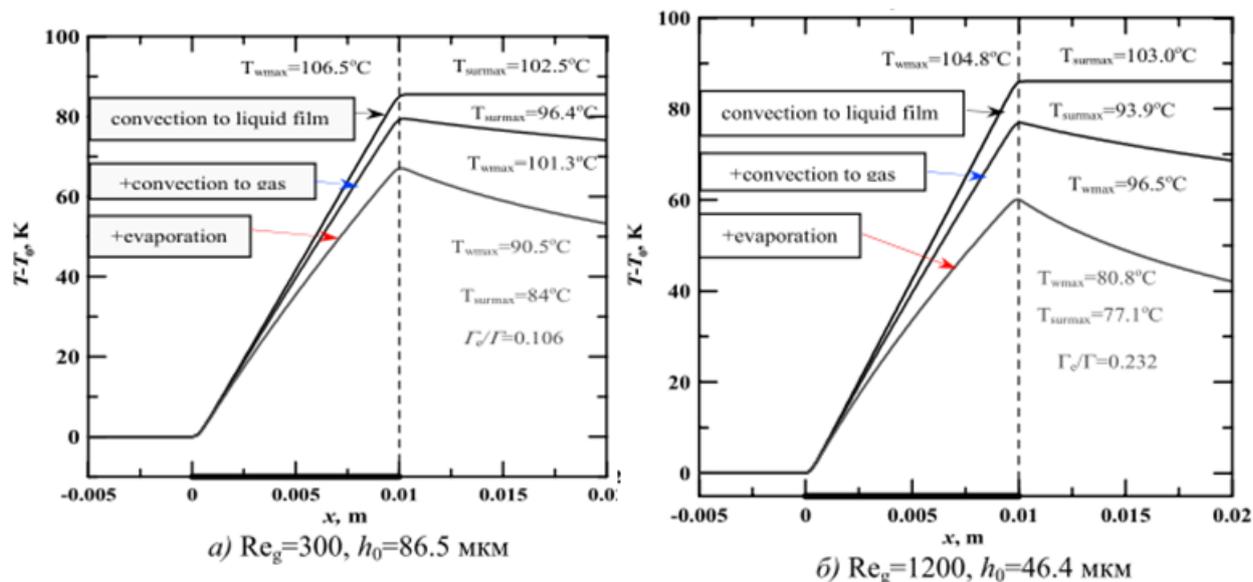


Рисунок 1.1 – Распределение температуры на поверхности раздела воды и азота [2].

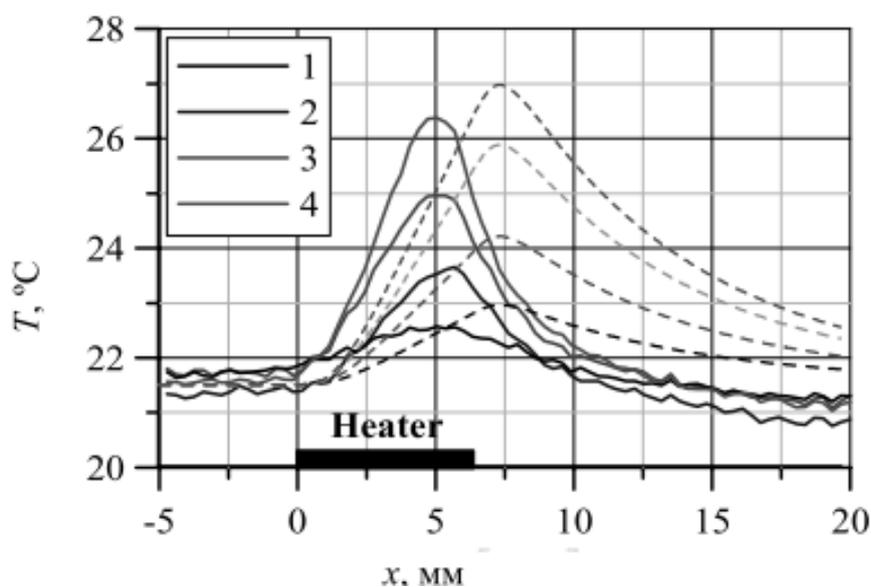


Рисунок 1.2 – Температура на поверхности пленки воды по длине нагревателя. Сплошные линии – экспериментальные данные осредненной температуры вдоль ширины нагревателя, штриховые – расчеты; $Re = 8.5$, $Re_g = 534$; 1 – $q = 1.01$ Вт/см²; 2 – 1.88 Вт/см²; 3 – 3.04 Вт/см²; 4 – 3.8 Вт/см² [2].

Проведены исследования [3] динамики испарения горизонтального слоя жидкости (HFE-7100) под действием потока газа (азота), измерения проводились с помощью двух независимых методов. Применяемые методы согласуются между собой, различие в измерениях не превышали 15%. В работе изучалось

изменение скорости испарения в зависимости от температуры газа и жидкости, скорости потока газа, а также толщины слоя жидкости. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей потока газа от 0,014 до 0,24 м/с и толщины слоя жидкости от 1,5 до 8 мм. Получены зависимости массовой скорости испарения от средней скорости потока газа и от толщины слоя жидкости при температурах 20°C, 30°C и 40°C. Зафиксировано возникновение локального максимума массовой скорости испарения, который возникает при увеличении толщины слоя жидкости и смещается в сторону большей толщины жидкости пропорционально росту температуры жидкости и газа, достигая максимального значения при определенной толщине слоя, после чего наблюдается снижение интенсивности испарения. Приведены эмпирические зависимости, которые могут использоваться для определения массовой скорости испарения при различной скорости потока газа и температуры жидкости и газа [3]:

$$Q_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1,82} U_g^{0,147}, \quad (1)$$

$$Q_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1,89} U_g^{0,164}, \quad (2)$$

$$Q_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1,86} U_g^{0,173}, \quad (3)$$

$$Q_1 = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1,75} U_g^{0,161}, \quad (4)$$

где Q_1 – массовая скорость испарения, кг/(м²с); T – температура жидкости и газа, °C; U_g – скорость потока газа, м/с. Формула (1) – для толщины слоя жидкости 1,5 мм, формулы (2), (3) и (4) для толщины слоя жидкости 3, 5 и 8 мм соответственно.

Установлено, что локальный максимум массовой скорости испарения при возрастании температуры смещается в сторону большей толщины слоя жидкости.

При локальном нагреве тонких слоев жидкости (от 1 до 10 мм) наблюдается появление поверхностной неустойчивости испаряющейся пленки жидкости, что приводит к разрыву слоя жидкости и появлению сухих пятен на поверхности нагревателя. Причины, влияющие на разрыв локально нагреваемых пленок жидкости, движущихся под действием потока газа в миниканале экспериментально исследовались в работе [4]. Изучено изотермическое течение

пленки жидкости и течение пленки под действием локального нагревателя, толщина пленки составляла 2 мм. Установлено, что при изотермическом течении при увеличении расхода газа на поверхности пленки появляются двухмерные волны, которые в дальнейшем переходят в трехмерные. Исследования по разрыву пленки проводились в диапазоне тепловых потоков от 0,87 до 32,1 Вт/см². Зафиксировано, что термокапиллярный разрыв пленки при двухмерных волнах начинается с образования впадины в нижней части нагревателя, с увеличением теплового потока нагреватель полностью осушается. В режиме трехмерных волн увеличение теплового потока приводит к образованию устойчивых структур, так называемых «регулярных структур». Приведена зависимость критического теплового потока, при котором происходит разрыв пленки жидкости (рис.1.3). Авторами установлено, что при малых значениях числа Рейнольдса потока жидкости, разрыв происходит при таких же значениях теплового потока, как и для гравитационной пленки. Однако при больших числах Рейнольдса движущейся пленки жидкости разрыв происходит при значениях теплового потока в 3 раза выше, чем для гравитационного течения. Таким образом, зафиксировано, что поток газа приводит к стабилизации течения локально нагреваемой пленки жидкости.

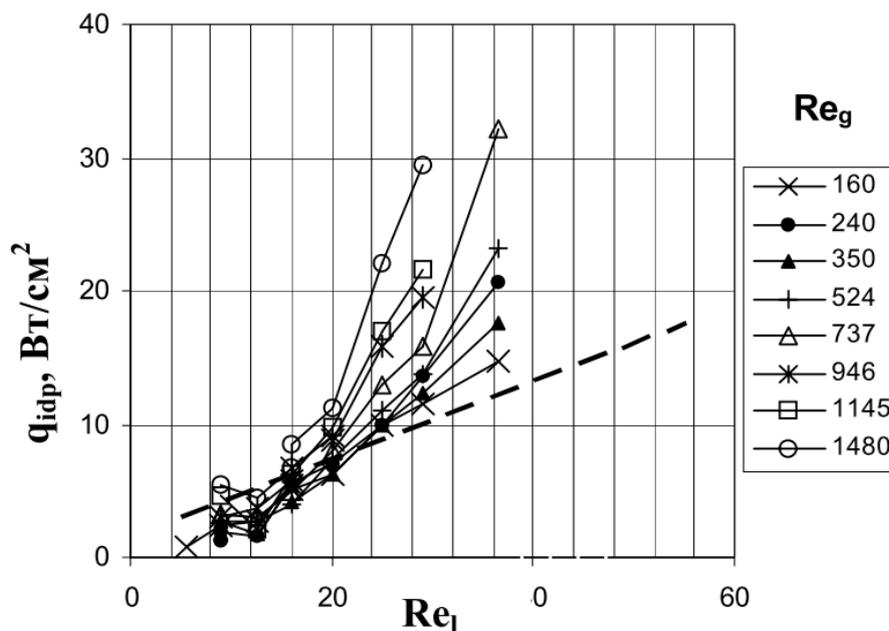


Рисунок 1.3 – Зависимость критического теплового потока от чисел Рейнольдса потоков жидкости и газа: Re_1 – число Рейнольдса потока жидкости, Re_g – число Рейнольдса потока газа [4].

При течении слоя жидкости под воздействием источника теплоты, основным процессом теплообмена между жидкой и газовой фазой становится испарение. В работе [5] представлена математическая модель движения двухфазного потока в микроканале с учетом испарения. Установлено, что стабилизация температуры пленки жидкости наступает сразу после нагревателя, в обоих направлениях потока. Зафиксировано, что при нагреве тонких слоев жидкости межфазный коэффициент теплообмена не является константой. Коэффициент межфазного теплообмена достигает максимального значения на передней кромке нагревателя (рис.1.4) и в силу неоднородности процесса испарения может изменяться более чем на порядок. Стоит отметить, что в данной модели принято допущение использования числа Био в качестве параметра задачи, что ограничивает ее применение на практике.

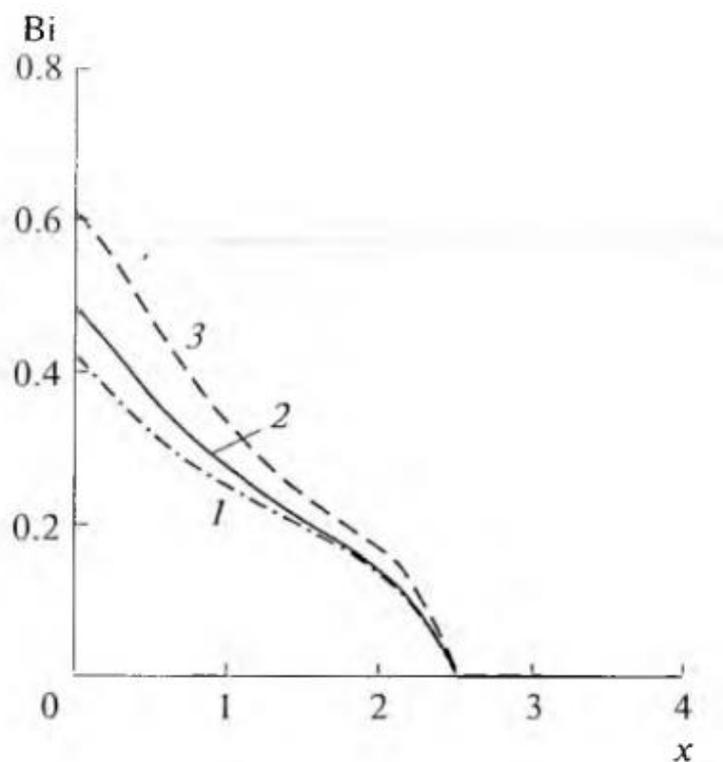


Рисунок 1.4 – Коэффициент межфазного теплообмена (Bi) для воды и азота. $q = 1 \text{ Вт/см}^2$, $Re = 1$. $Re_g = 5$ (1), 10 (2), 15 (3) [5].

Интенсивность тепломассопереноса и образование сухих пятен в промышленных аппаратах в основном определяется такими параметрами, как наименьшая толщина пленки и скорость испарения, которые в свою очередь определяются зависимостью вязкости и поверхностного натяжения жидкости от температуры. Численное исследование влияния температурной зависимости вязкости и поверхностного натяжения на процесс испарения слоя жидкости под действием потока газа в микроканале при локальном нагреве проводилось в работе [6]. Расчеты выполнены для горизонтального канала высотой 250 мкм, при начальной температуре 20°C. Температура рабочей поверхности поддерживалась равной 25 °C, с помощью нагревателя размерами 2 × 10 мм². Свойства газа и жидкости соответствуют азоту и воде. Проводились исследования для случаев, когда и вязкость и поверхностное натяжение не зависело от температуры, когда один из параметров зависел от температуры и когда оба параметра зависели от температуры. Установлено, что наибольшая интенсивность испарения происходит, когда вязкость и поверхностное натяжение зависят от температуры. Авторами зафиксировано, что даже при слабом нагреве учет зависимости вязкости от температуры приводит к уменьшению толщины слоя жидкости и, как следствие увеличению интенсивности испарения. При этом отмечено, что максимальная толщина слоя жидкости мало подвержена влиянию переменной вязкости и определяется термокапиллярным эффектом.

Перспективность использования движущихся тонких пленок жидкости, под действием потока газа, для охлаждения оборудования с высокими тепловыделениями показана в работе [7]. Авторами экспериментально исследовался кризис теплообмена и разрыв движущейся пленки жидкости, под действием потока газа. Исследования проводились в горизонтальном миниканале, с локальным нагревателем из меди размером 1 × 1 см, в качестве рабочей жидкости применялась дистиллированная вода, в качестве газа – воздух. В процессе экспериментов достигнут тепловой поток 250 Вт/см². Эксперименты

проводились при постоянном числе Рейнольдса потока жидкости, которое составляло 21, число Рейнольдса потока газа изменялось в диапазоне от 360 до 2700. Приведенная скорость газа варьировалась от 4 до 30 м/с. Установлено, что сухие пятна на нагревателе растут с увеличением теплового потока, достигая температуры насыщения, поверхность нагревателя покрывается тонкой метастабильной пленкой жидкости, на которой с большой частотой появляются и исчезают сухие пятна. Достигнув критического значения теплового потока (q_{cr}) нагреватель полностью осушается, что сопровождается существенным ростом температуры. Полученные результаты сопоставлены с данными полученными для гравитационной пленки. Установлено, что при малых расходах газа пленка жидкости менее устойчива к разрыву, по сравнению с гравитационной, однако при больших числах Рейнольдса потока газа, тепловой поток, приводящий к разрыву пленки, выше в 2 раза (рис. 1.5). В результате проведенной работы были достигнуты высокие значения тепловых потоков, что подтверждает перспективность использования жидких пленок под действием потока газа в системах охлаждения.

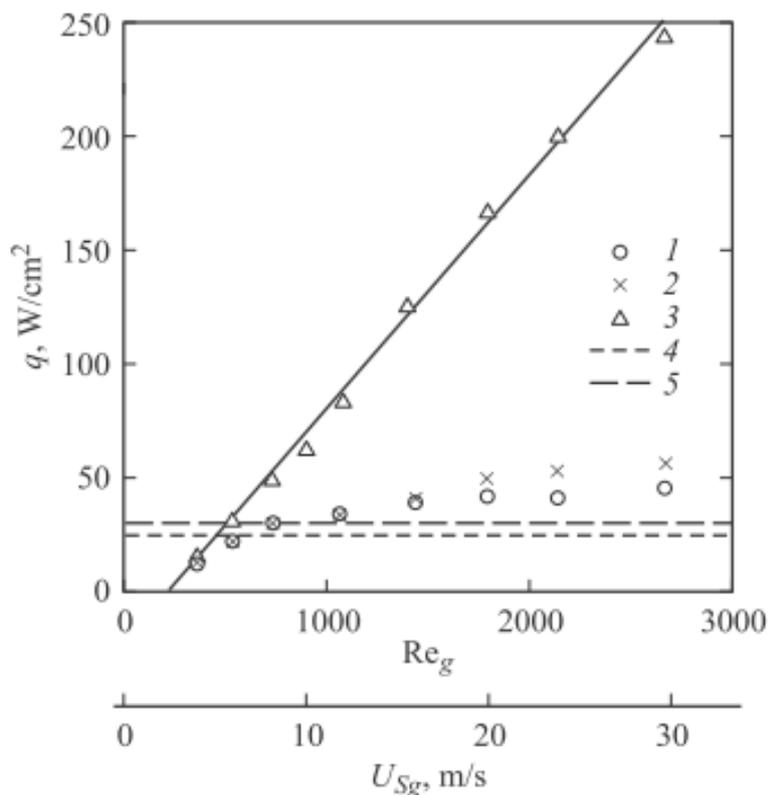


Рисунок 1.5 – Влияние расхода газа на разрыв пленки и кризис теплообмена при $Re_g = 21 : 1$ – пороговое значение теплового потока для разрыва пленки (q_{idp}); 2 – $q_{idp,H}$; 3 – критический тепловой поток (q_{cr}); для пленки жидкости, свободно стекающей по вертикальной поверхности

$$(q_{idp} = q_{idp,H}) : 4 - q_{idp}, 5 - q_{cr}. [7].$$

В работе [8] разрабатывалась аналитическая модель для определения теплопередачи в движущейся пленке жидкости, под действием противоточного потока газа, с учетом локального нагрева. При разработке модели, коэффициент теплообмена между жидкостью и газом, а также тепловой поток от нагревателя к жидкости считались заданными. Проведенные исследования позволили получить уравнение, описывающее распределение температур в пленке жидкости, а также решение этого уравнения в виде сходящегося ряда. Расчетные зависимости температуры жидкости на поверхности нагрева приведены на рис. 1.6. Результаты получены при длине участка нагрева $l = 100$; $Bi = 0,1$; $Pe/Pr = 1$, толщина пленки не изменялась. Установлено, что равновесное значение температуры достигается вблизи передней кромки нагревателя. Теплообмен с газом вызывает снижение температуры жидкости ниже участка нагрева. Протяженность зоны, в которой осуществляется нагрев пленки жидкости до равновесной температуры, уменьшается при возрастании противоточного потока газа, при этом область нагретой пленки становится более ограниченной.

Уравнения, позволяющие получить распределение температур в пленке жидкости [8]:

$$x < 0: T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n}{1 + S_n} \cdot (e^{p_n x} - e^{p_n(x-1)}) \cdot \cos(\beta_n y),$$

$$x \in (0; l): T = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \left(1 - \frac{e^{p_n(x-1)} + S_n e^{q_n x}}{1 + S_n} \right) \cdot \cos(\beta_n y),$$

$$x > l: T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n S_n}{1 + S_n} \cdot (e^{q_n(x-1)} - e^{q_n x}) \cdot \cos(\beta_n y),$$

Здесь:

$$p_n = 0,5(k_n + \sqrt{k_n^2 + 4\beta_n^2}) > 0,$$

$$q_n = 0,5(k_n - \sqrt{k_n^2 + 4\beta_n^2}) < 0;$$

$$F_n = \frac{2}{\beta_n^2 + Bi \cdot \cos^2 \beta_n};$$

$$S_n = -\frac{p_n}{q_n} > 0;$$

$$k_n = \frac{Pe}{Bi \cdot \cos \beta_n} \cdot (P + Q);$$

$$P = 3 \sin \theta \cdot \left(0,5 \beta_n \cdot \sin \beta_n + \frac{\sin \beta_n}{\beta_n} - 1 \right),$$

$$Q = r \cdot (\beta_n \sin \beta_n + \cos \beta_n - 1).$$

Здесь l – длина участка нагрева, м; T – температура жидкости, К; x, y – координаты, м; Bi – число Био; Pe – число Пекле; $q_n, p_n, \beta_n, S_n, F_n, k_n$ – коэффициенты.

Расчеты показали, что при $Bi \leq 0,1$ достаточно взять 3–4 члена ряда, при $Bi \approx 1$ требуется взять 10–11 членов ряда.

Таким образом, распределение температуры в пленке жидкости полностью определяется параметрами Bi, Pe, r, θ .

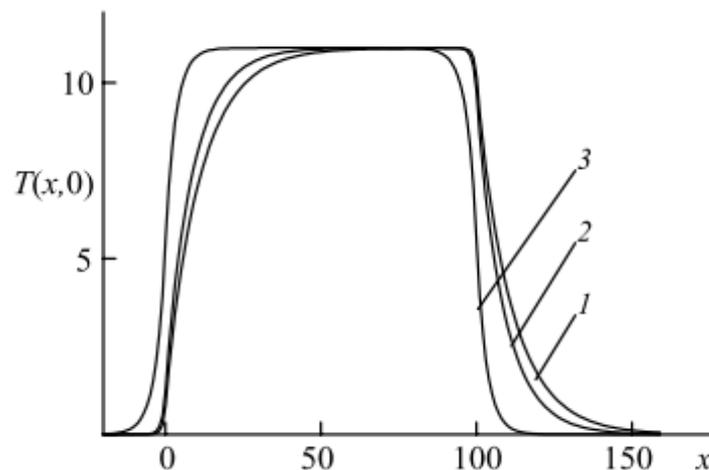


Рисунок 1.6 – Температура жидкости на поверхности нагрева 1: $Re = 1$; 2: $Re = 0,75$; 3: $Re = 0$ [8].

Авторами работы [9] зафиксировано, что изменение продольного и поперечного размеров нагревателя, при сохранении общей площади, оказывает влияние на интенсивность испарения, динамику и предельные значения толщины пленки жидкости, которая движется под действием потока газа в микроканале. Исследования проводились численными методами. Расчеты выполнялись для двухфазного потока азота и воды, при высоте канала 250 мкм, площадь нагревателя составляла 1 см², температура поверхности нагревателя принималась равной 21°С, число Рейнольдса потока жидкости $Re_{ж}=5$, для потока газа $Re_{г}=15$. Установлено, что форма нагревателя оказывает значительное влияние на интенсивность испарения жидкости. Отмечается, что при небольшом нагреве испарение более интенсивно у широких нагревателей, по сравнению с нагревателями протяженными в направлении потока. Образующийся на передней кромке нагревателя вал жидкости не зависит от длины и ширины нагревателя, при этом минимальная толщина пленки уменьшается с ростом длины нагревателя. Приведены температурные зависимости концентрации пара, поверхностного натяжения и динамического коэффициента вязкости, которые имеют вид [9]:

$$C_* = C_0 + C_T(T - T_0) + C_{TT}(T - T_0)^2 / 2,$$

$$\mu = 1/\mu_0 + \mu_T(T - T_0) + (\mu_{TT}(T - T_0)^2 / 2)^{-1},$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_0) + \sigma_{TT}(T - T_0)^2 / 2,$$

здесь $C_*(T)$ – концентрация пара при давлении насыщения;
 $C_0, C_T, C_{TT}, \mu_0, \mu_T, \mu_{TT}, \sigma_0, \sigma_T, \sigma_{TT}$ – постоянные величины.

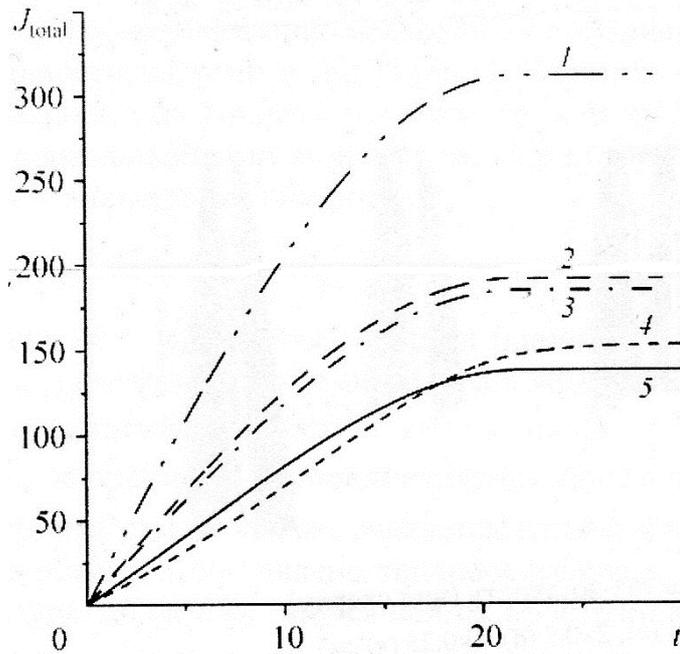


Рисунок 1.7 – Безразмерная скорость испарения жидкости от времени. Размеры нагревателей: $0,1 \times 10$ (1), $0,25 \times 4$ (2), 1×1 (3), $2 \times 0,5$ (4), $4 \times 0,25$ (5) см^2 [9].

В работе [10] проводилось экспериментальное исследование влияния массового паросодержания на градиент давления и коэффициент теплоотдачи при движении двухфазного потока хладагента R134a в миниканале, а также причины возникновения неустойчивостей в потоке. Эксперименты проводились в канале с гидравлическим диаметром 540 мкм при массовых расходах хладагента от 105,1 до 632,5 $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$, плотность подводимого теплового потока составляла $q_{\text{evap}} = 2,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Установлено, что в миниканалах потери давления из-за вязкого трения возрастают с уменьшением размера сечения, при этом наибольший рост потерь наблюдается при массовом расходе хладагента от 306,1 $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ и выше. Коэффициент теплоотдачи растет пропорционально увеличению паросодержания, максимальный темп роста наблюдается при паросодержании $x < 0,1$. Определены соотношения для расчета коэффициента теплоотдачи [10]:

при паросодержании $x < 0,1$:

$$\alpha = 1,55 Re_l^{0,15} C_0^{0,85} Pr_l^{0,4} Bo^{0,01} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,01} \frac{1}{(1-x)^{3,2}} \frac{k_l}{D_h},$$

при паросодержании $0,1 < x < 0,5$:

$$\alpha = 1,13 Re_l^{0,23} C_0^{0,85} Pr_l^{0,4} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,01} \frac{1}{(1-x)^{0,84}} \frac{k_l}{D_h},$$

здесь Re_l – число Рейнольдса, C_0 – число стесненности, Pr_l – число Прандтля жидкости, Bo – критерий кипения, $\frac{\rho_v}{\rho_l}$ – соотношение плотностей фаз, k_l – теплопроводность жидкости, D_h – гидравлический диаметр.

Свободная энергия слоя жидкости складывается из двух составляющих: объемной и поверхностной энергии $G = G_v + G_\sigma$. Уменьшение толщины слоя жидкости приводит к уменьшению объемной энергии и поверхностная энергия становится основным значимым фактором. Поверхностная энергия является результатом взаимодействия ван-дер-ваальсовой силы и силы двойного электрического слоя. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры существенно влияет на движение неравномерно нагретого тонкого слоя жидкости, имеющего свободную границу и находящегося в силовом поле, в результате чего возникает термокапиллярный эффект, в тонких слоях жидкости термокапиллярная сила может стать главным движущим фактором. Экспериментально зафиксировано, что при определенном значении толщины слоя жидкости, плоская поверхность разделяется на две характерные толщины слоя, в результате чего формируется пальцеобразная неустойчивость. Влияние термокапиллярного эффекта на процесс движения испаряющейся пленки жидкости, рассматривается в работе [11]. Численно исследовались движения горизонтальной пленки несжимаемой жидкости, движущейся по твердой подложке, жидкость омывалась собственным паром. Установлен характер изменения скорости движения фронта жидкости в зависимости от параметра испарения, при различных числах Марангони. Наблюдается потеря устойчивости тонкого слоя жидкости и образование на поверхности пальцеобразной структуры, что вызвано наличием эффекта Марангони.

Изучение теплоотдачи к недогретой до температуры насыщения пленке жидкости под влиянием термокапиллярных сил, волновых эффектов и испарения проводилось в работе [12]. Исследования проводились для пленок воды и жидкости FC-72, которые стекали по нагревателю 60×120 мм. Плотность

теплового потока, подводимого к слою жидкости, варьировалась в интервале от 2,5 до 50 кВт/м². Установлено, что термокапиллярные силы способны оказывать различный эффект на процесс теплообмена. Как правило, разрыв пленки и формирование сухих пятен, приводит к снижению конвективного коэффициента теплоотдачи, с другой стороны амплитуда волнового движение может привести к интенсификации теплообмена, за счет смывания сухих пятен. Зафиксировано, что при термокапиллярно–волновом течении пленки жидкости теплоотдача увеличивается на 25–70% при $Re = 10 - 50$.

Влияние расхода газа и температуры на массовую скорость испарения экспериментально изучалось в работе [13]. Исследовался двухфазный поток «этиловый спирт – воздух» при атмосферном давлении в диапазоне температур от 20 до 40 °С, расход воздуха варьировался от 100 до 500 мл/мин. Измерена массовая скорость испарения с межфазной границы площадью 100 мм². Представлены зависимости массовой скорости испарения от температуры и от средней скорости потока газа, которые описываются степенными функциями:

для системы «этиловый спирт – воздух» [13]:

$$Q_1 = C_1 T^{1,22}, Q_1 = V_1 U_g^{0,54};$$

для системы «HFE-7100 – азот»:

$$Q_1 = C_2 T^{1,17}, Q_1 = V_2 U_g^{0,176};$$

где Q_1 – массовая скорость испарения, кг/(м²·с); T – температура газа и жидкости, °С; $C_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ и $C_2 = 1 \cdot 10^{-3}$, кг/(м²·с·°С); U_g – скорость потока газа, м/с; $V_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ и $V_2 = 6 \cdot 10^{-2}$, кг/м³.

Проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными. Анализируя полученные результаты, установлено, что при увеличении температуры рост скорости испарения не зависит от теплофизических свойств газа и жидкости, в то время, как влияние скорости газа на интенсивность испарения существенно зависит от данных свойств.

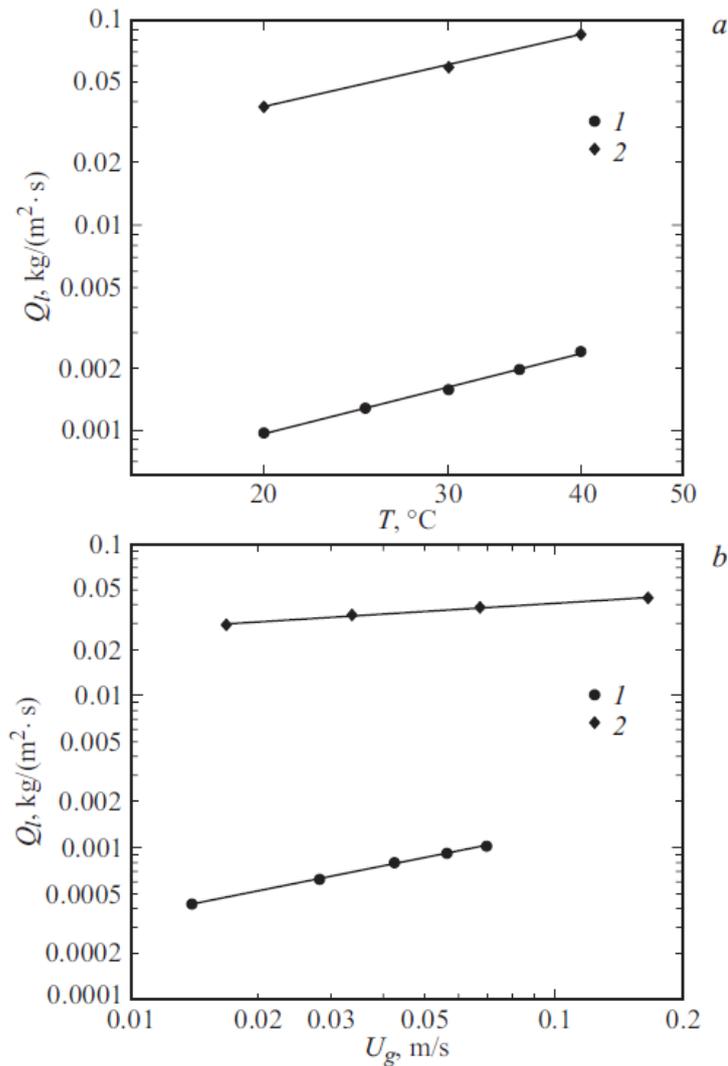


Рисунок 1.8 – Зависимость массовой скорости испарения от температуры при скорости газа 0.06 м/с (а) и от средней скорости потока газа при температуре жидкости и газа 25°С (b). 1 – «этанол–воздух»; 2 – «HFE–7100–азот» [13].

В работе [14] проводилось исследование процессов теплообмена, при испарении пленок жидкости, движущихся по гладкой и сетчатой поверхности. Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса потока жидкости от 30 до 270, в качестве рабочей жидкости применялась смесь фреонов R21 и R114, а также чистый фреон R21. Приведены зависимости коэффициента теплоотдачи от теплового потока в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса. Установлено, что в режиме испарения при тепловых потоках $q \leq 1 \cdot 10^4$ Вт/м², коэффициент теплоотдачи не зависит от величины теплового потока и от концентрации летучего компонента. Отмечено, что коэффициенты теплоотдачи на поверхности

с сетчатым покрытием, до 2 раз превышают, соответствующие значения полученные на гладкой поверхности. Данное явление вызвано увеличением поверхности испарения и образованием менисков с областями утончения пленки, по всему периметру сетки. Увеличение расхода жидкости приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи, как для гладкой, так и для сетчатой поверхности.

Зафиксировано, что для веществ с близкими температурами кипения коэффициент теплоотдачи не зависит от концентрации летучего компонента.

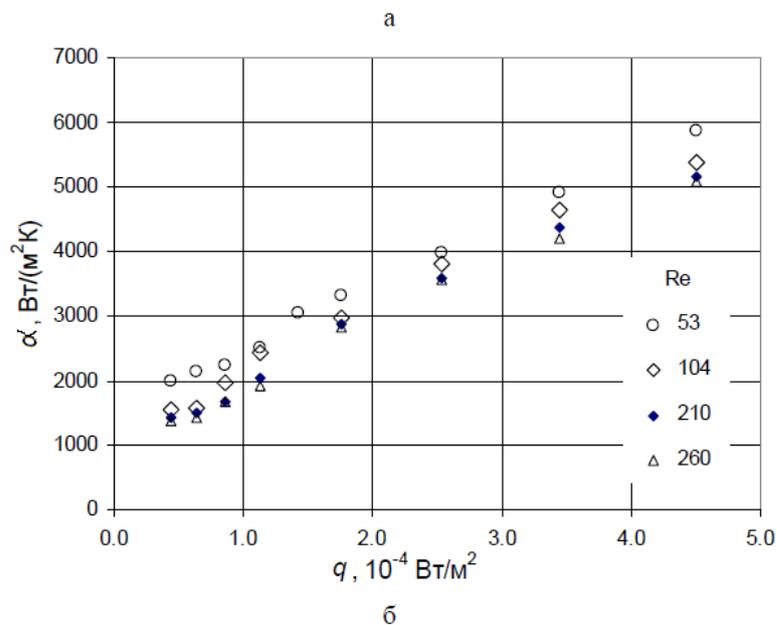
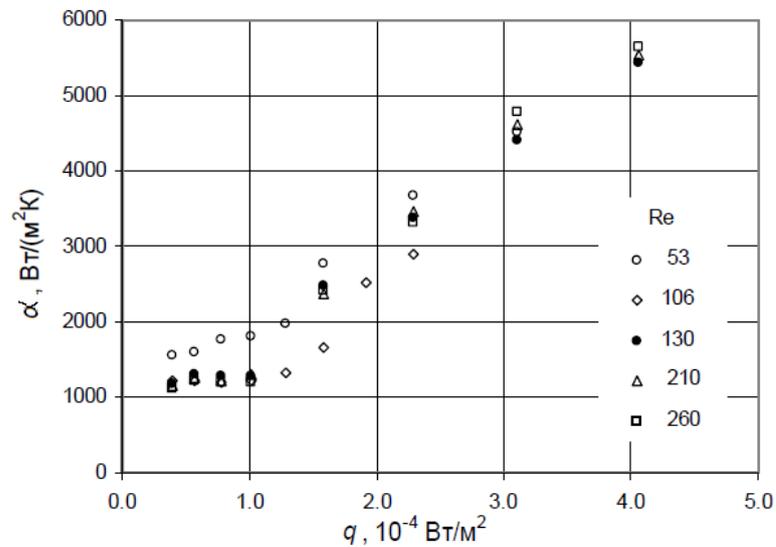


Рисунок 1.9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока в диапазоне чисел Рейнольдса от 53 до 260:

а – гладкая труба; б – труба с сетчатым покрытием [14].

Под действием капиллярных сил, которые перераспределяют потоки жидкости, протекание теплообмена изменяется по сравнению с каналами больших размеров. Исследование межфазного массообмена от одиночного снаряда в прямоугольном миниканале проводилось в работе [15]. В качестве рабочего участка применялись прямоугольные каналы сечением 3,5×4,9; 3,9×3,8; 3,9×7,5; 4,5×13; и 9,6×9,7 мм, исследовалась дистиллированная вода, в которую впрыскивался углекислый газ, который формировал снаряд. Представлены зависимости коэффициента массоотдачи, в виде модифицированных чисел Шервуда. Установлено, что наличие гомогенной реакции, приводит к интенсификации массообмена на 14 – 22%, при этом степень интенсификации не зависит от размеров газового снаряда. Получены степенные зависимости для безразмерного коэффициента массообмена (Sh), в прямоугольных миниканалах. На рисунке 1.10 приведены коэффициенты массоотдачи, полученные в ходе экспериментов.

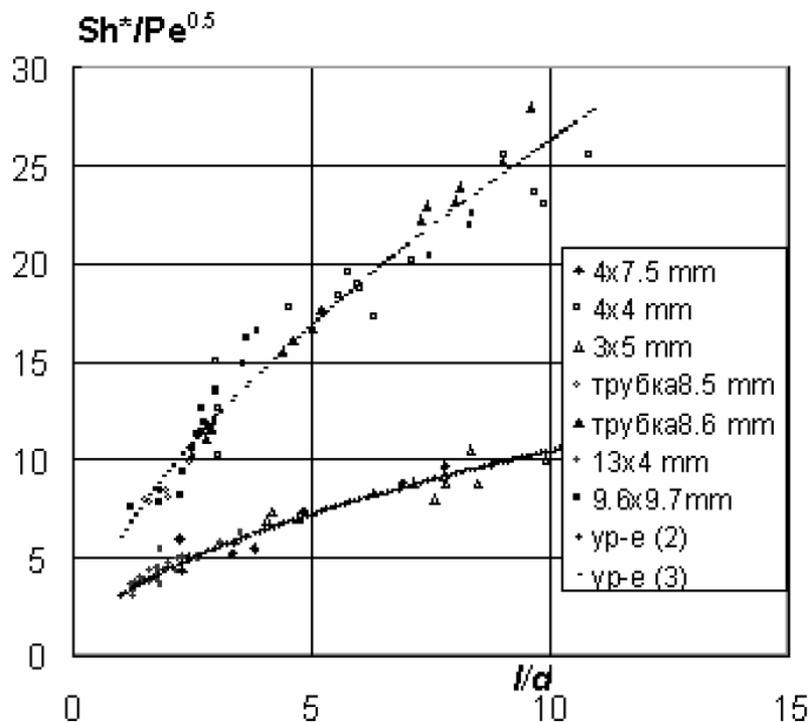


Рисунок 1.10 – Экспериментально полученные коэффициенты массоотдачи для всех каналов [15].

В работе [16] изучалось влияние ориентации каналов на процессы теплообмена в микроканальных системах. Для исследования применялась двухфазная система вода – азот и хладон R21. В качестве экспериментального участка использовался прямоугольный миниканал размером $0,72 \times 1,5$ мм². В ходе экспериментов фиксировались значения локального теплового потока, которые определялись через температурный напор на измерительной пластине, теплотери не превышали 0,19 Вт/К. Получена зависимость локального коэффициента теплопередачи микроканального теплообменника от паросодержания при массовом расходе 137.2 кг/м²с. Экспериментальные данные подтверждают, что изменение ориентации микроканального теплообменника, не оказывает существенного влияния на теплоотдачу (рис. 1.11).

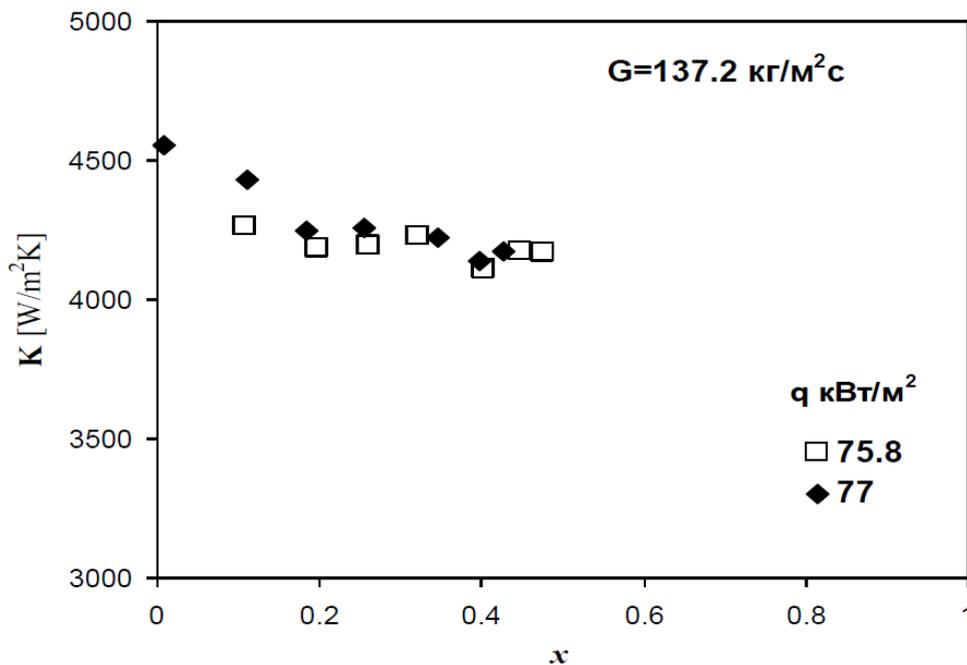


Рисунок 1.11 – Зависимость локального коэффициента теплопередачи микроканального теплообменника от паросодержания при массовом расходе 137.2 кг/м²с. Светлые точки – вертикальное течение, темные точки – горизонтальное течение [16].

Влияние температурного напора на испарение движущейся пленки фреона R11 экспериментально исследовалось в работе [17]. В качестве нагревателя использовалась полированная медная пластина размерами $285 \times 120 \times 10$ мм,

нагреваемая элементами Пельтье. Размеры открытого сечения движущейся пленки составляли $4,5 \times 0,6$ мм. Установлено, что интенсивное испарение в области, где пленка имеет минимальную толщину и деформированную межфазную поверхность, вызывает не растекание, а стягивание жидкости вниз по потоку, даже при равновесном угле смачивания близком к нулю. Капиллярный подток жидкости не успевает скомпенсировать быстрое испарение. Данные явления приводят к возникновению теплового контактного угла, величина которого увеличивается с ростом температуры стенки. Приведена зависимость отношения количества испарившейся жидкости к общему количеству жидкости, подаваемой в рабочий участок, от температурного напора (рис. 1.12). При течении жидкости по оребренной поверхности наблюдается разрыв пленки в окрестности ребер, что сопровождается формированием теплового краевого угла и образованием локальных краевых утолщений (продольные валы). Толщина продольных валов увеличивается с ростом температуры нагревателя. Данные продольные валы вызывают разрыв пленки и формирование сухих пятен. Зафиксировано, что под действием интенсивного испарения при ламинарно – волновом режиме течения амплитуда крупных волн уменьшается, либо происходит полное исчезновение данных волн.

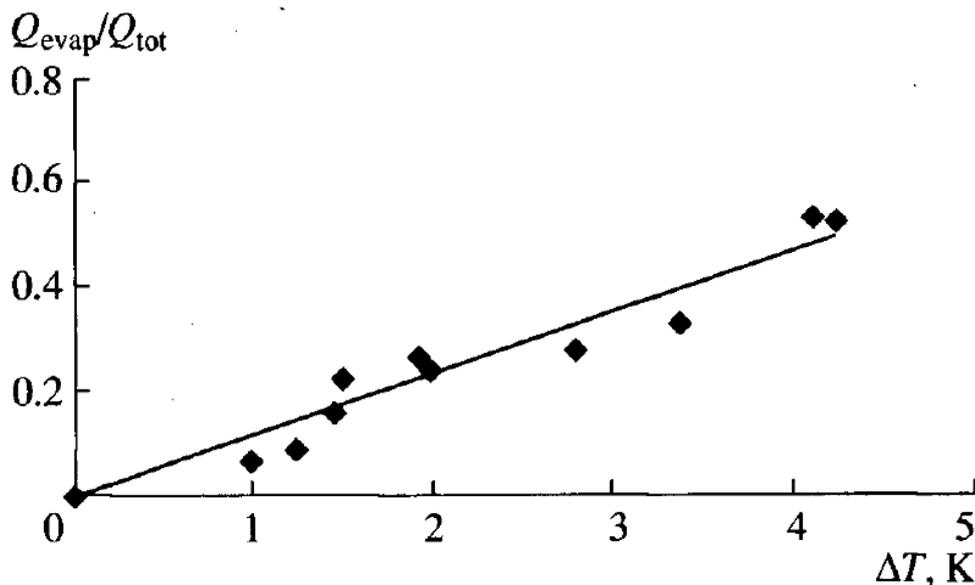


Рисунок 1.12 – Доля испарившейся жидкости в зависимости от температурного напора [17].

Распределение скорости испарения по поверхности слоя жидкости под действием потока газа имеет неравномерный характер. На поверхность раздела фаз воздействуют два механизма: касательное напряжение и термокапиллярное напряжение. Сочетание этих механизмов генерирует нестабильную структуру теплового потока на поверхности жидкости. Структура межфазной границы и скорость испарения зависят от скорости потока газа и теплофизических свойств жидкости. В работе [18] проводилось численное исследование влияния описанных выше механизмов на процесс испарения тонких слоев жидкости под действием потока газа. При моделировании принимался рабочий участок с поверхностью испарения размером 50×50 мм и толщиной слоя жидкости 1,6 мм. Газ принимался как идеальный и несжимаемый. В качестве рабочей жидкости использовался этиловый спирт. Исследования проведены при скоростях потока газа 1,4 и 8 л/мин, число Рейнольдса потока газа варьировалось в диапазоне от 14 до 115. Представлено изменение межфазной поверхности с течением времени, а также вычислена максимальная разность температур между самой горячей и самой холодной точкой на поверхности раздела фаз, данная величина составила 2,8 К. Установлено, что максимальное испарение наблюдается в месте входа газа на рабочий участок. Отмечается, что увеличение массовой скорости испарения с возрастанием расхода газа увеличивается не пропорционально. Скорость испарения зависит от паросодержания в газовой фазе, при достижении стационарного состояния тепловая структура (ячейки на межфазной границе) на границе раздела жидкости и газа не оказывает влияния на скорость испарения.

Экспериментальное исследование теплоотдачи от локального источника теплоты к жидкой пленке проводилось в работе [19]. Исследования проведены при атмосферном давлении, в качестве переменных параметров использовались длина нагревателя, число Рейнольдса и плотность теплового потока. При проведении экспериментов влажность атмосферного воздуха составляла $50 \pm 5\%$, температура 20°C , толщина слоя жидкости равна 2,5 мм. В качестве рабочей жидкости применялся 25% раствор этилового спирта. Установлено, что форма

нагревателя не оказывает существенного влияния на процесс испарения жидкой пленки. Разрушение двухфазного потока наблюдалось в непосредственной близости к нагревателю. Зафиксировано уменьшение коэффициента теплопередачи с ростом числа Рейнольдса потока жидкости. Приведены зависимости относительного теплового потока в зависимости от числа Рейнольдса, а также в зависимости от разницы температур между стенкой нагревателя и пленки жидкости.

Экспериментально исследовались значения коэффициента теплоотдачи и кризисные явления теплового потока при стекании пленки переохлажденной (ниже температуры конденсации) воды по вертикальной стенке, при этом осуществлялся равномерный подогрев поверхности, по которой стекала пленка жидкости [20]. Для ламинарного и турбулентного режимов течения пленок определен параметр искажения, который представляет собой отношение допустимой разницы поверхностного натяжения к динамическому давлению однородного потока пленки. Экспериментально установлено, что при достижении постоянного значения параметра искажения, тепловой поток увеличивается и происходит разрушение пленки жидкости.

Испарение пленок жидкости с высоким значением теплового потока для получения фундаментальных данных, которые позволят усовершенствовать системы охлаждения на основе тонкопленочных технологий, изучалось в работе [21]. Экспериментально установлено, что пленка жидкости, омываемая потоком газа в прямоугольном канале, устойчива в широком диапазоне скоростей двухфазного потока. Эксперименты проведены в миниканале с установленными в нем нагревательными элементами. Построена режимная карта течений изотермического потока, а также измерены длины гладкой и волновой области. Установлено, что значение критического теплового потока, при котором формируются устойчивые сухие пятна, до трех раз выше, чем для гравитационной пленки жидкости. Зафиксировано, что характер разрыва пленки жидкости различен для каждого режима течения. С помощью инфракрасного сканера измерено распределение температуры на поверхности

пленки, и отмечено, что термокапиллярные касательные напряжения могут превышать касательные напряжения, вызванные трением газа, что указывает на значительное влияние эффекта Марангони.

Термокапиллярный эффект, вызванный неоднородностью температурного поля, оказывает существенное влияние на процессы тепломассообмена и должен быть учтен при проектировании оборудования, что на практике является трудной задачей. Авторами работы [22] проводилось исследование неустойчивости двумерного стационарного режима течения жидкостной пленки с неоднородным температурным полем на межфазной границе. Установлено, что критерием перехода к струйному режиму течения является наличие возмущений выносимых потоком из узкой области, которые не успевают достигнуть заметной амплитуды. В результате проделанной работы установлен предел, до которого можно пренебречь мелкомасштабной трехмерной структурой и описывать течение в двумерном виде.

При измерениях термокапиллярных деформаций в неизотермической стекающей пленке жидкости, зафиксировано возникновение горизонтального термокапиллярного вала, перед которым наблюдалась впадина. В работе [23] проводилось исследование, направленное на установление причины возникновения возмущений перед термокапиллярным валом жидкости. Установлено, что на наличие впадины перед валом оказывает влияние угол наклона поверхности, впадина отсутствует при выполнении условия $Re > Re_*$, где критическое число Рейнольдса, определяется по следующей зависимости:

$$Re_* = \frac{(60,75)^{3/2}}{3} \left[\frac{\rho \sigma_0^3}{g \mu_0^4} \right]^{1/2} \frac{\sin^4 \theta}{\cos^{9/2} \theta}.$$

Теоретически изучалось возникновение трехмерной структуры пленочного течения в неизотермических условиях. [24]. В работе также представлены результаты численного моделирования возникновения периодических структур при пленочном течении и формирование температурного поля на свободной поверхности. При моделировании выделено три характерные области: область невозмущенного течения, область слабых возмущений, устойчивая область.

Установлено, что на устойчивость структуры течения пленки существенное влияние оказывает интенсивность локального источника тепла. Полученные теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными, установлено хорошее соответствие с данными инфракрасной термографии.

Для слоев жидкости толщиной менее 100 мкм твердые молекулы поверхности взаимодействуют с молекулами, находящимися на границе раздела фаз, через межмолекулярные силы, тем самым изменяя местное давление на поверхности жидкостной пленки. Силы расклинивающего давления (P_{dis}) могут быть, как отрицательным, так и положительными, в зависимости от соотношения поверхности жидкости и твердой поверхности. С увеличением толщины слоя жидкости величина расклинивающего давления уменьшается. Местное давление в поверхности пленки жидкости определяется по следующей формуле:

$$P = P_0 + P_{dis}$$

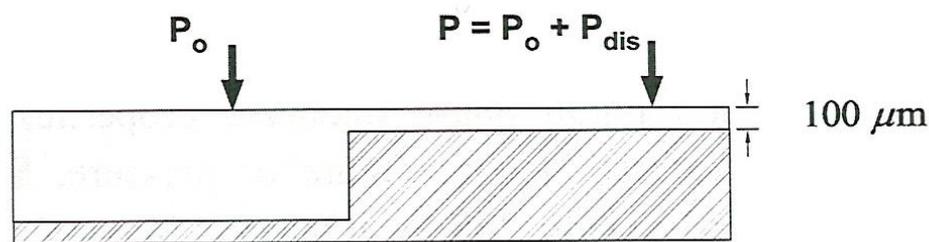


Рисунок 1.13 – Расклинивающее давление в тонкой пленке.

Расклинивающее давление – это термодинамический параметр, характеризующий состояние тонкого слоя жидкости или газа в промежутке между поверхностями тел.

Изменение давления на межфазной поверхности оказывает влияние на местное равновесие фазы. Расклинивающее давление влияет на распределение тонких слоев жидкости (рис. 1.13). Если давление P_{dis} отрицательное, то жидкость будет перемещаться в область с большей толщиной, на которое воздействует только давление P_0 . Методом численного анализа показали, что в каналах с гидравлическим диаметром 10 мкм, расклинивающее давление оказывает эффект на коэффициент теплопередачи.

Кривизна поверхности раздела фаз, также играет роль в изменении условий равновесия на поверхности жидкости. При контакте с паровой фазой, поверхность жидкостной пленки искривляется под действием поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение является результатом неустойчивости межмолекулярных сил на границе раздела жидкости и пара (рис. 1.14). Внутренние молекулы жидкого слоя «пропускают» молекулы из парового слоя, в результате чего происходит изменение сил равновесия. При уменьшении гидравлического диаметра канала, поверхностное натяжение становится доминирующей силой [25]

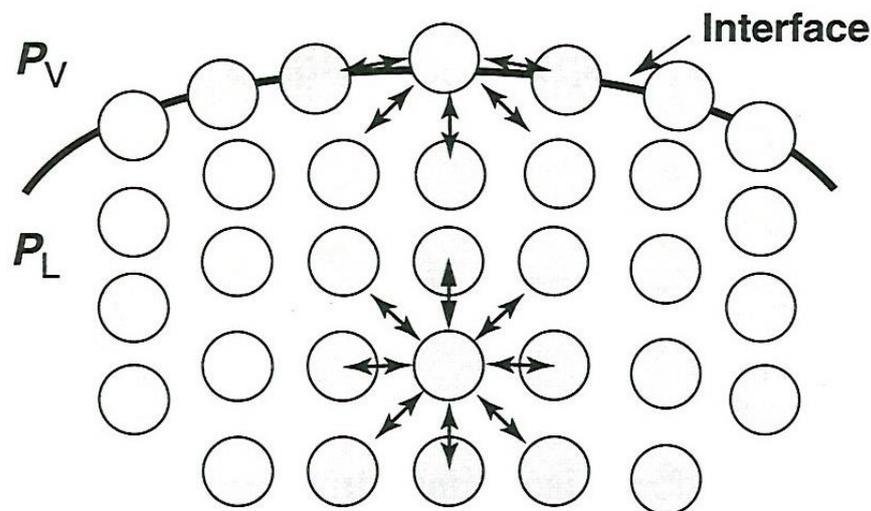


Рисунок 1.14 – Схема несбалансированных поверхностных сил на границе раздела жидкости и пара

Уравнение Юнга-Лапласа связывает перепад давлений между жидкостью и паром с формой поверхности испаряющейся жидкости, как функцию поверхностного натяжения.

$$P_L - P_V = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$P_L - P_V = \frac{2\sigma}{R}$$

Здесь R_1 и R_2 – основные радиусы искривления для произвольной межфазной поверхности.

Приведенные выше уравнения указывают на то, что для тонкого слоя жидкости в состоянии равновесия давление пара ниже, чем давление жидкости. Роль граничных эффектов, таких как искривление жидкостной пленки и поверхностное натяжение, оказывает влияние на теплопередачу в тонких слоях жидкости при испарении и конденсации [25].

1.2. Определение коэффициента аккомодации

В настоящее время экспериментальные исследования тепломассоперноса при испарении не проведены в объеме позволяющем установить эмпирические постоянные, характеризующие процесс парообразования при испарения. В качестве такой постоянной может быть использован коэффициент аккомодации, определяемый по закону Герца –Кнудсена в математическом выражении [26].

На поверхности раздела фаз пар может быть как насыщенным, так и перегретым или перенасыщенным в зависимости от коэффициента конденсации, при этом состояние пара вдали от межфазной поверхности не оказывает никакого влияния. При коэффициенте конденсации (испарения) равном 1 на межфазной поверхности в обычных условиях пар должен быть перегрет при конденсации и перенасыщен при испарении. Установлены условия физического сопряжения гидродинамической области с границей фазового перехода в процессах испарения и конденсации. Предполагается, что в зоне сопряжения происходят определенные эффекты, которые характеризуют термодинамическое состояние пара и зависят от особенностей молекулярного обмена на поверхности конденсата [27].

Применение метода обратных балансов для анализа интенсивного испарения жидкостей не дает достоверных результатов для проведения прогностического моделирования оборудования. Установление характеристики состояния межфазной поверхности, в качестве которой может использоваться коэффициент испарения (конденсации), является необходимым для развития модельных представлений процесса испарения. В работе [28]. проведен анализ констант испарения жидкости под действием потока газа. В качестве испаряющейся жидкости выбрана вода, рабочим газом являлись пары керосина. В ходе экспериментальных исследований получены значения массовой скорости испарения. Определены плотности водяного пара в непосредственной близости к поверхности испаряющейся жидкости. Используя теоретические положения Герца – Кнудсена и, найденные экспериментально, значения массовой скорости

испарения получены константы испарения (коэффициент испарения). Установлено, что температура поверхности жидкости, испаряющейся под действием потока газа, равна максимальной температуре испарения воды. Отмечено, что температура паров воды около поверхности испаряющейся жидкости может приниматься равной температуре раздела фаз. Полученные константы испарения можно применять при проведении моделирования процессов теплообмена в газо- и парокпельных технологиях. Установлено, что значение коэффициента испарения существенно меньше 1.

Закономерности парообразования при испарении жидкости, нагретой до температуры ниже температуры кипения, экспериментально исследованы в работе [29]. В качестве исследуемой жидкости применялась дистиллированная вода. Исследования проведены в интервале температур от 313 до 363 К. Приведены зависимости массовой скорости испарения от времени и от температуры. Продолжительность проведения экспериментов изменялась в диапазоне от 25 до 125 минут, с шагом 25 минут. Установлено, что с течением времени значение массовой скорости испарения не изменяется. Используя закон Герца – Кнудсена, определены коэффициенты аккомодации дистиллированной воды в исследуемом диапазоне температур. Зафиксировано, что коэффициент аккомодации увеличивается с ростом температуры.

В работе [30] методом численного моделирования изучалось влияние коэффициента аккомодации на теплообмен. Установлено, что зависимость теплового потока от коэффициента аккомодации имеет линейный характер. Получена зависимость теплового потока от отношения температуры поверхности к температуре торможения. Показано, что тепловой поток уменьшается линейно с увеличением отношения температуры поверхности к температуре торможения. Влияние температурного фактора на значение теплового потока ослабляется при уменьшении числа Кнудсена.

Используя теоретические положения Герца – Кнудсена, получен метод определения коэффициента аккомодации, описанный в работе [31]. Пропорциональность между потоком массы и разностью давления насыщенного

пара и парциальным давлением пара в газе выражается кинетическим уравнением Герца – Кнудсена (1).

$$J = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi R_g T_l}} (P(T_l) - p_s), \quad (1)$$

где R_g , м²кг/(Кмоль·с²) – идеальная газовая постоянная, деленная на молярную массу пара; T_l , °С – температура на границе раздела со стороны жидкости; α – коэффициент аккомодации.

Давление пара при определенной температуре выражает уравнение Клаузиуса – Клапейрона (2), используя скрытую теплоту парообразования.

$$P(T) = p_0 \exp\left(\frac{L(T_0)}{R_g} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (2)$$

где $L(T_0)$, кДж/кг – скрытая теплота парообразования (испарения) в состоянии равновесия;

Дополнительно сформулировано соотношение определяющее поток массы, которое имеет вид:

$$J = \alpha \rho_s L \left(\frac{M}{2\pi R_g T_s^3}\right)^{1/2} (T - T_s), \quad (3)$$

где J – массовая скорость испарения, кг/(м²с); α – коэффициент аккомодации; L , кДж/кг – скрытая теплота испарения; ρ_s , кг/м³ – плотность пара; M , кг/кмоль – молекулярный вес; R_g , м²кг/(Кмоль·с²) – универсальная газовая постоянная; T_s , °С – температура насыщенного пара.

Используя выражение (3), можно получить уравнение для определения коэффициента аккомодации.

$$\alpha = \frac{J}{\rho_s L \left(\frac{M}{2\pi R_g T_s^3}\right)^{1/2} (T - T_s)};$$

1.3. Термокапиллярные эффекты, возникающие в тонких слоях жидкости

Конвективные движения в слое жидкости, возникающие за счет всплытия жидкости с повышенной плотностью известны как конвекция Релея – Бенара. Конвекция Релея – Бенара исследовалась в горизонтальном слое жидкости преимущественно между твердыми стенками [32]. В работе [33] исследовалась конвекция, вызванная поверхностным натяжением (конвекция Марангони). В тоже время конвекция в слое жидкости со свободной границей остается, менее исследована.

Известно, что существуют два основных механизма влияющие на неустойчивость в системах со свободной границей. Механизм неустойчивости возникающей за счет силы Архимеда, является более важным, для относительно толстых слоев жидкости. В то время, как неустойчивость обусловленная термокапиллярным эффектом является доминирующим в тонких слоя жидкости. Множество работ посвящены, определению границы, так называемой чистой конвекции обусловленной всплытием жидкости с повышенной плотностью (конвекция Релея – Бенара). В системах со свободной границей возможны два вида неустойчивости- стационарные [34] и колебательные [35]. В случае конвекции Марангони в системах со свободной границей обнаружено, что существует множество видов неустойчивости. А именно, возникновение в форме ячеек [36], деформация свободной поверхности приводящая к возникновению сухих пятен [37], продольные [38] и поперечные [39] колебательные неустойчивости. Но наиболее распространенными являются случаи, в которых присутствуют одновременно оба механизма, возникновения неустойчивости. В условиях проведения экспериментов, градиент температуры не является идеально вертикальным, таким образом появляется горизонтальный компонент температурного градиента.

В большинстве исследований, рассматривается слой жидкости, который непрерывно нагревается снизу с постоянным градиентом температуры и без учета испарения. Исследований посвященных испаряющимся слоям жидкости намного меньше, поскольку испарение существенно усложняет задачу.

Поисковые экспериментальные исследования, посвященные испаряющемуся слою однокомпонентной жидкости и наблюдения за развитием конвективных течений в мелком объеме жидкости проводились в работе [40]. В работе рассмотрено четыре основных режима конвекции для однокомпонентных жидкостей. Как оказалось, для всех жидкостей со слоем 2 мм и меньше, доминирующим режимом конвекции является режим, при котором возникают ячейки. Для умеренно испаряющихся жидкостей, такие как спирты, имеет место псевдо стабильная картина течения, временные «ячейки». Происходит либо рост, либо уменьшение ячеек или случайное движение ячеек из-за взаимодействия с соседними ячейками. Для интенсивно испаряющихся жидкостей (например, различные виды эфира) может наблюдаться неустойчивое состояние жидкости. В работе [41], используя линейную теорию устойчивости, проанализировано влияние нелинейных профилей температур перед началом конвекции, на порядок критического числа Марангони, в случае течения вызванным поверхностным натяжением в испаряющемся слое жидкости. Обнаружено, что в случае сильной нелинейности профиля температуры, критическое число Марангони, может быть намного выше, чем для соответствующего линейного профиля температуры.

Почти во всех доступных исследованиях, которые посвящены испарению в слое жидкости, испарение рассматривается только как средство охлаждения поверхности слоя. В тоже время игнорируется роль испарения само по себе в задаче конвективной устойчивости. Наблюдается недостаток работ посвященных сравнительному анализу неустойчивости, имеющий коротковолновую природу которые могут возникать в испаряющихся слоях жидкости. Опубликованы результаты экспериментов посвященные влиянию испарения на термокапиллярную конвекцию в тонком слое жидкости [42]. Обнаружено, что испарение не только влияет на охлаждение поверхности слоя, но также является движущей силой, влияющей на развитие конвективной неустойчивости.

Динамика неустойчивостей вызванные действием поверхностного натяжения, межфазных явлений и конвекции в двухслойной системе изучалась в

работе [43]. Проводился анализ взаимодействия между термогравитационной конвекцией, термокапиллярной конвекцией и конвекцией вызванной касательными напряжениями [44]. В работах проводились аналитические и численные решения движения жидкости в открытой горизонтальной полости под действием потока газа. Представлена топология конвективных течений с недеформируемой межфазной границей вследствие воздействия потока инертного газа. Исследовалось влияние тангенциальной составляющей напряжения, вызванное действием потока газа. Построены точные решения стационарной задачи конвективного течения с термокапиллярной межфазной границей в горизонтальном слое жидкости под действием потока инертного газа. Продемонстрировано наличие обратного течения по отношению к направлению потока газа вблизи межфазной границы.

В статьях [45] и [46] теоретически и экспериментально показано, что под действием термокапиллярных сил возникающих из-за температурного градиента на границе раздела жидкости и газа в стекающей пленки жидкости могут возникать структурные изменения в потоке жидкости, приводящие к обратному движению пленки жидкости.

Термокапиллярная конвекция оказывает существенное влияние на движение жидкости в двухфазных системах. [47],[48.]. Существенные перепады температур на границе раздела фаз вызывают волны, вихревые и возвратные течения, а также могут привести к разрыву пленки. [49], [50].

Выводы по первой главе

Процессы испарения лежат в основе технологии сжижения природного газа. Несмотря на перспективность исследования процессов испарения тонких слоев жидкости, движущихся в миниканале под действием потока газа, экспериментальных и теоретических работ недостаточно для детального понимания процессов тепломассопереноса на поверхности раздела жидкости и газа. Подробное изучение физических процессов происходящих при испарении тонких слоев жидкости под действием потока газа позволит повысить эффективность абсорбционного и испарительного оборудования применяемого для сжижения природного газа.

На основании анализа научных публикаций можно сделать вывод, что процесс испарения пленок жидкости под действием потока газа не изучен на уровне, который бы позволил осуществлять прогностическое моделирование высокотехнологического оборудования на базе мини – и микро – каналов.

В проведенных экспериментальных и теоретических работах исследовалась динамика процесса испарения в зависимости от температуры двухфазной системы, скорости потока газа, толщины слоя жидкости, а также влияние на процесс испарения нормальных и касательных напряжений, термокапиллярного эффекта, возникающих неустойчивостей потока жидкости. Отмечается, что вязкость и поверхностное натяжение зависит от температуры и приводит к изменению интенсивности испарения, при увеличении толщины пленки жидкости главным фактором испарения становится термокапиллярный эффект. При этом причины изменения скорости испарения при различных параметрах не объясняются с физической точки зрения.

В известных работах не проводится экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи в двухфазном потоке жидкости и газа. При разработке теоретических моделей процесса испарения коэффициент теплоотдачи, как правило, является заданным [12], [15], [25], или определяется аналитически с учетом паросодержания испаряющейся смеси [14], [18], [23]. Сложность экспериментального определения коэффициента теплоотдачи состоит в том, что он изменяется вдоль поверхности испарения и зависит от паросодержания.

Отсутствуют экспериментальные работы, показывающие распределение температуры по толщине слоя жидкости и вдоль поверхности испарения. В данной области исследований имеются лишь теоретические работы [12], достоверность которых не проверена на практике. В работе [12] температура на поверхности жидкости определяется через интегральное уравнение теплопереноса. Отмечается, что при $Bi \ll 1$ перепад температуры по толщине пленки мал. При $Bi \approx 1$ температура на поверхности пленки существенно меньше, чем на поверхности нагревателя. Также отмечается, что при $Re \approx 10$ вблизи передней кромки нагревателя имеется участок, на котором температура жидкости несколько меньше температуры газа.

Стоит отметить, что значительное внимание уделяется изучению неустойчивостей в пленке жидкости, приводящих к образованию сухих пятен или разрушению поверхности. Исследовалось [9] влияние формы нагревателя на интенсивность испарения. При этом полученные результаты противоречат друг другу, в одних утверждается, что форма нагревателя оказывает существенное влияние на интенсивность испарения, в других отмечается, что форма нагревателя не влияет на процесс испарения.

Анализ исследований показал, что изучались потоки жидкости, движение которых осуществлялось за счет потока газа, или движение жидкости вовсе отсутствовало (табл. 1.1). Экспериментальных или теоретических работ по исследованию испарения слоя жидкости с принудительной циркуляцией обнаружено не было. В известных работах результаты сопоставляются между значениями, полученными для пленки жидкости, стекающей под действием сил гравитации и пленки, движущейся под действием потока газа. Отсутствуют

работы, в которых проведено сравнение интенсивности испарения при подвижном и неподвижном слое испаряющейся жидкости.

Таблица 1.1 – Состояние исследований процесса испарения тонких слоев жидкости

Жидкость	Газ	$Re_{ж}$	$Re_{г}$	Механизм движения слоя жидкости	Тепловой поток/массовая скорость испарения	Источник
Вода и FC-72	Воздух	0,5-12	0,3-30	Движение под действием потока газа	$q=4-10 \text{ Вт/см}^2$	[1]
Вода	Азот	1-20	300-1200	Движение под действием потока газа	$q=6,2-70 \text{ Вт/см}^2$	[2]
HFE-7100	Азот	0	40-200	Неподвижный слой	$W = 0,02 - 0,12 \text{ кг/м}^2\text{с}$	[3]
Вода	Воздух	5,5-36,5	160-1480	Движение под действием потока газа	$q=0,87-32,1 \text{ Вт/см}^2$	[4]
Вода	Азот	1	5-15	Движение под действием потока газа	$q=0,5-1,5 \text{ Вт/см}^2$	[5]
Вода	Воздух	3	15	Движение под действием потока газа	-	[6]
Вода	Воздух	21	360-2700	Движение под действием потока газа	$q=10-250 \text{ Вт/см}^2$	[8]
Вода	Азот	5	15	Движение под действием потока газа	Безразмерная скорость испарения	[10]
Вода и FC-72	Воздух	10-50	0	Движение под действием сил гравитации	$q=0,25-5 \text{ Вт/см}^2$	[13]
Этанол	Воздух	0	30-3000	Неподвижный слой	$W = 0,001 - 0,0024 \text{ кг/м}^2\text{с}$	[14]
25% раствор этилового спирта	Воздух	0,06-9	0	Движение под действием сил гравитации	$q=0,2-9,6 \text{ Вт/см}^2$	[20]
FC-72 и вода	Воздух и азот	8,5-32	534-1164	Движение под действием потока газа	$q=0,8-32 \text{ Вт/см}^2$	[22]

Ввиду вышеперечисленного, исследования процессов теплообмена при взаимодействии движущейся пленки жидкости с параллельным потоком газа

является актуальным, так как данные исследования позволят повысить эффективность оборудования используемого в низкотемпературных технологических процессах.

Настоящая работа отличается от ранее известных тем, что исследования проводились при циркуляции слоя испаряющейся жидкости, толщиной 1, 2, 3, 4, 5 и 8 мм. Область входящих факторов включала широкий диапазон изменения параметров потока газа и жидкости (по температурам от 20 до 50°C, по расходу газа от 100мл/мин до 1000мл/мин).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА

2.1.1. Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента

При проведении экспериментального исследования динамики испарения подвижного слоя жидкости под действием потока газа, в качестве входных параметров воздействия выбраны: температура жидкости и газа; расход воздуха, подаваемого в рабочий участок; площадь межфазной поверхности, толщина слоя жидкости. Все перечисленные параметры контролируются и поддерживаются постоянными на протяжении всего эксперимента. Методы изменения и контроля входных параметров, подробно описаны в разделе 2.2.

В качестве выходных переменных эксперимента выбраны: расход парогазовой смеси на выходе из рабочего участка и количество жидкости, подкачиваемой в рабочий участок, для поддержания плоской межфазной поверхности. Средства контроля выходных параметров, описаны в разделе 2.2.

2.1.2. Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

Для получения высокой результативности, проводимых экспериментов, составлен рациональный план исследования.

Первоначально выполнена оценка объема экспериментальной работы и определено необходимое количество экспериментальных исследований. После чего определены границы регистрируемых параметров, которые обусловлены предельными показаниями измерительной аппаратуры и техническими возможностями экспериментального оборудования.

На следующем этапе устанавливается последовательность проведения измерений. Как правило, используются последовательный или рандомизированный план. Последовательный план заключается в изменении исследуемого параметра от максимального к минимальному значению или

наоборот. Рандомизированный план основан на случайном чередовании независимой переменной. Выбор последовательного или рандомизированного плана зависит от того является ли эксперимент воспроизводимым или нет [51].

Последовательный план необходимо применять для невоспроизводимых экспериментов. Если эксперимент является воспроизводимым, то для него подходит и последовательный, и рандомизированный план. Ввиду того, что процесс испарения подвижного слоя жидкости под действием потока газа, в выбранных экспериментальных условиях, невозможно воспроизвести повторно, относим проводимые исследования к невоспроизводимым.

Так как эксперимент является невоспроизводимым, выбираем последовательный план исследования.

Известно, что [52], экспериментальные исследования подразделяются на активные и пассивные. Поскольку при проведении исследований факторы задаются самостоятельно в каждом опыте, проводимые в данной работе эксперименты будут относиться к активным. При пассивном эксперименте происходит только регистрация исследователем уровней факторов, без оказания на них какого-либо влияния.

Количество регистрируемых значений выбирается таким образом, чтобы величина случайной погрешности не превышала систематическую погрешность.

2.1.3. Выбор области изменения основных факторов

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке, толщина подвижного слоя жидкости изменялась от 1 до 8 мм. Исследования пленок жидкости толщиной от 1 до 10 мм обусловлено тем, что в мини- и микроканальной аппаратуре используются слои жидкости, толщина которых попадает в данный диапазон, поэтому их изучение является наиболее актуальным [53]. В качестве рабочей жидкости использовался этанол (95% (масс.), ГОСТ Р 51723-2001). Поверхность испарения, обдуваемая потоком газа (воздуха), составляла 100мм², при размере выреза в пластине 10x10мм. Расход газа варьировался от 100 до 1000мл/мин с шагом 100мл/мин, что соответствует

средней скорости газа от 0,014м/с до 0,139м/с. Выбор интервала изменения скорости газа обусловлен техническими возможностями регулятора расхода, используемого в экспериментальной установке. Эксперимент повторялся при температурах газа и жидкости от 20 до 50°С, погрешность измерения термомпарами составляла не более 0,1°С. Диапазон изменения экспериментальных температур, обусловлен физико-химическими свойствами рабочей жидкости, нагрев до температур выше 50°С приводит к нарушению экспериментальных условий, необходимых для получения достоверных результатов. Основные факторы воздействия сведены в таблицу 2.1

Таблица 2.1 – Основные факторы воздействия

Скорость газа	0,014м/с – 0,139м/с.
Температура системы «жидкость – газ»	20 – 50°С.
Площадь межфазной поверхности	100мм ² .
Скорость движения пленки жидкости	8,3·10 ⁻⁵ м/с
Давление в контуре	атмосферное
Жидкость, используемая в системе	этанол (95% (масс.)), ГОСТ Р 51723-2001
Газ, используемый в системе	Воздух

2.1.4. Методика проведения эксперимента

При проведении эксперимента температуры жидкости и газа поддерживаются одинаковыми. Для установления требуемой температуры газа, поступающего в рабочий участок, нужно включить термостат (рис. 2.1) и установить необходимую температуру. Перед запуском термостата, необходимо открыть верхний лючок и убедиться в наличии рабочей жидкости в емкости термостата. Изменение температуры осуществляется с помощью кнопок «вверх» и «вниз», удерживая при этом кнопку «SET». Термостат нагревает до заданной температуры теплоноситель, который прокачивается по каналам, тем самым нагревая поток воздуха.



Рисунок 2.1 – Фотокадр термостата

Следующим шагом является заполнение жидкостного контура этиловым спиртом. Заполнение участка осуществляется с помощью перистальтического насоса (рис. 2.2). Насос имеет три независимых ролика, на каждом из которых можно задать собственное направление вращения, тем самым либо подавать жидкость в рабочий участок, либо откачивать ее. Управление насосом осуществляется с помощью кнопок расположенных на верхней панели под экраном. С помощью стрелок производится переключение между режимами и настройка требуемых значений, кнопка «√» служит для подтверждения выбранной операции. К насосу подключаются трубки, по которым прокачивается этиловый спирт. Направление движения жидкости по трубкам можно изменять, через меню перистальтического насоса, для этого во вкладке «Rate» требуется изменить направление стрелки, указывающей направление вращения роликов. Скорость прокачиваемой жидкости задается в том же меню, для увеличения или уменьшения количества жидкости, подаваемой в рабочий участок, нужно переместить активное меню (выделено белым цветом) в поле с

указание значения скорости, нажать кнопку «V», после чего с помощью стрелок «вверх», «вниз» увеличить или уменьшить значение. Выбор активного ролика осуществляется в правом верхнем углу экрана, например на рис. 2.2 выбран второй ролик, который откачивает жидкость из рабочего участка. Для изменения рабочего ролика, переводим активное меню в правый верхний угол, нажимаем кнопку «V» и выбираем с помощью стрелок требующийся ролик. Жидкость подается в рабочий участок до тех пор, пока не будет установлена плоская межфазная граница (рис. 2.3). После проведения эксперимента требуется откачать жидкость из рабочего участка.



Рисунок 2.2 – Перистальтический насос

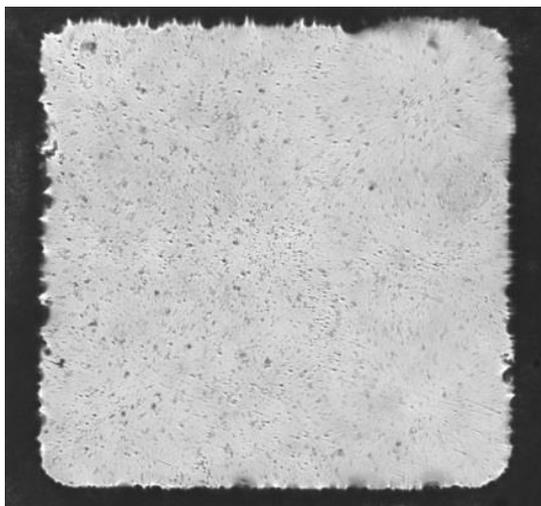


Рисунок 2.3 – Плоская межфазная граница

Регулирование температуры рабочей жидкости осуществляется с помощью пьезоэлемента, который нагревает, либо охлаждает медную подложку. Для того чтобы осуществлять охлаждение жидкости, необходимо изменить полярность пьезоэлемента на источнике питания (рис. 2.4). Изменение мощности нагрева, осуществляется с помощью регуляторов на источнике питания, с помощью которых увеличивается или уменьшается напряжение подаваемое на пьезоэлемент. Во избежание поломок нагревательного элемента не рекомендуется устанавливать значение напряжения выше 10 В.

Подача воздуха в рабочий участок осуществляется с помощью мембранного насоса (рис. 2.5), который запускается с источника питания, путем подачи напряжения на насос. Значение напряжения может изменяться с помощью регуляторов на источнике питания (рис. 2.4). Для обеспечения безопасной работы газового насоса, рекомендуется подавать напряжение 10 В, при этом напряжение должно быть не меньше 5 В, при более низком напряжении газовый насос не запустится.

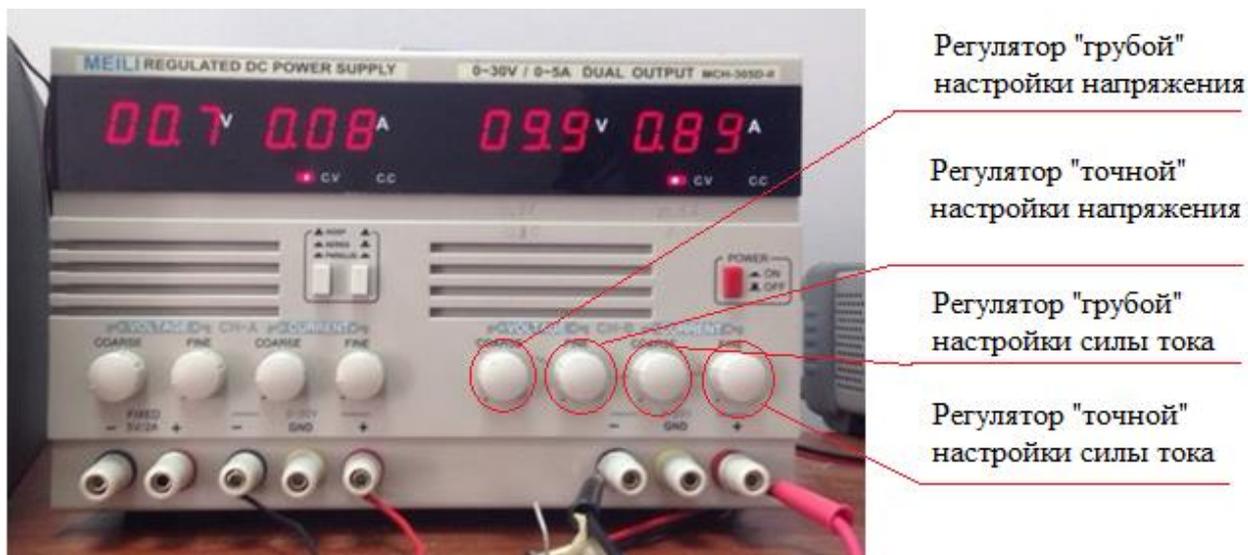


Рисунок 2.4 – Источник питания

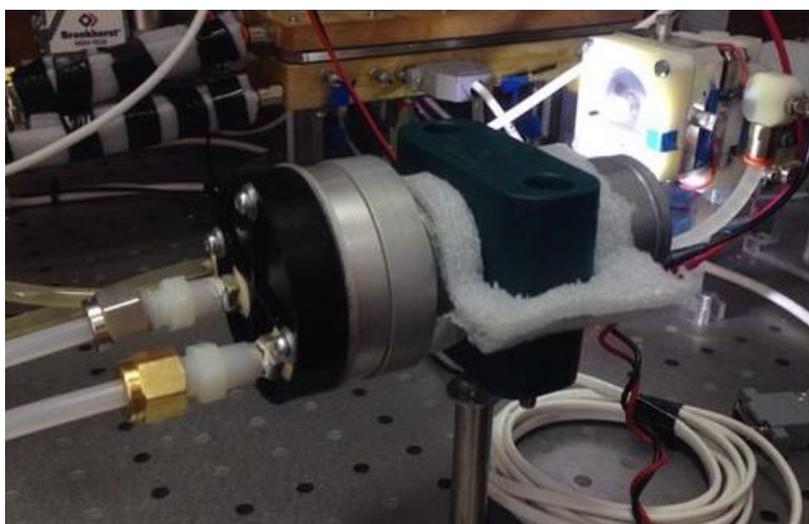


Рисунок 2.5 – Мембранный насос

Количество газа, подаваемого в рабочий участок задается с помощью массового регулятора расхода «Bronkhorst» (рис. 2.6). Управление регулятором осуществляется с помощью программы «Control NL-4A0» (рис. 2.7). На рис. 2.7 выделена строка, в которой производится регулировка расхода воздуха. В поле «Значение» требуется установить необходимый расход газа в интервале от 100 до 1000 мл/мин, после чего нужно нажать кнопку «Послать», отправленное значение отобразится в поле «Значение на выходе».



Рисунок 2.6 – Регулятор расхода «Bronkhorst»

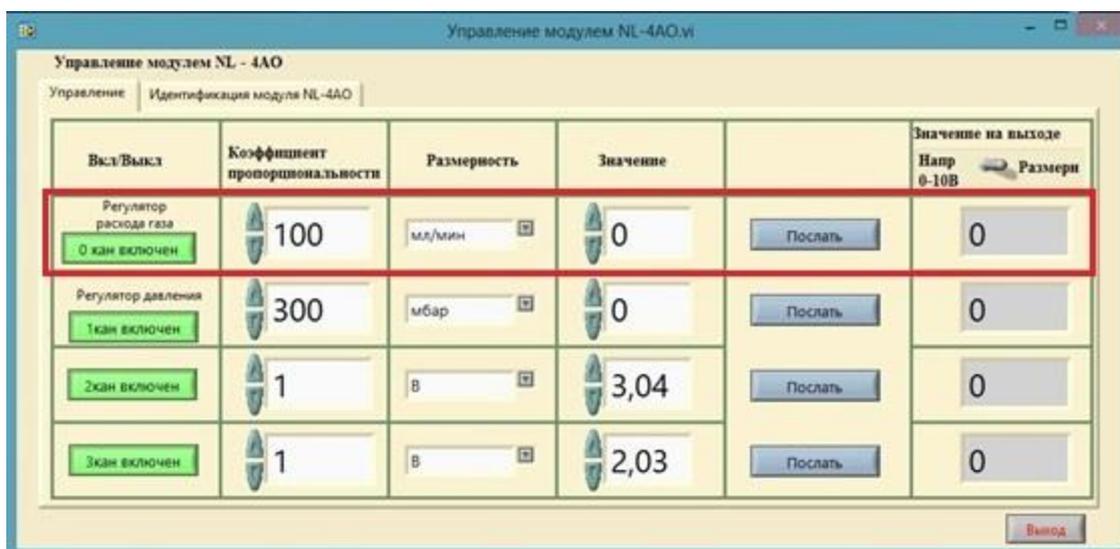


Рисунок 2.7 – Интерфейс ПО «Control NL-4A0»

Температура газа и жидкости измеряется с помощью термисторов, установленных в рабочем участке. Все измеряемые параметры эксперимента регистрируется с помощью программного обеспечения «Agilent BenchLink DataLogger» (рис. 2.8).

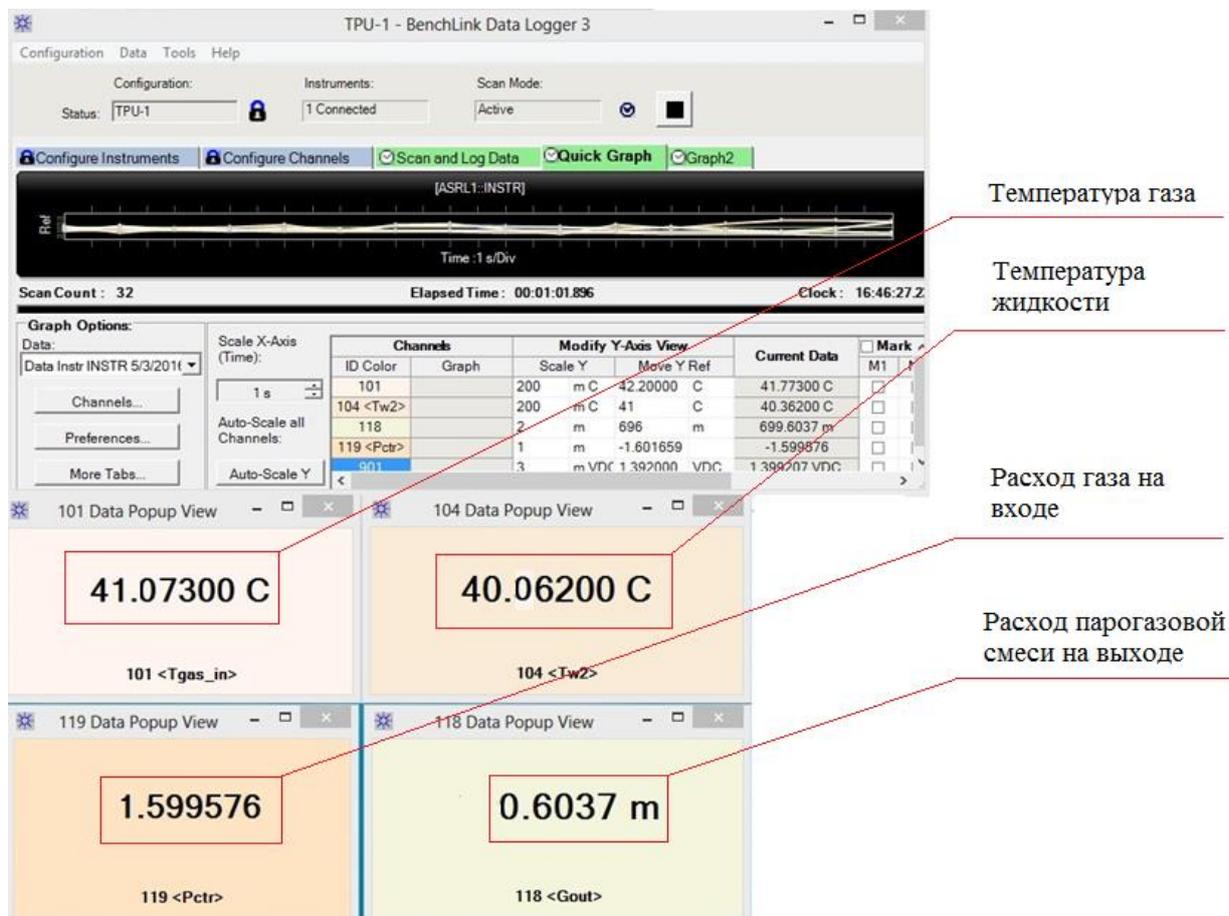


Рисунок 2.8 – Интерфейс ПО «Agilent BenchLink DataLogger»

Программное обеспечение «Agilent BenchLink DataLogger» запускается с ярлыка «Agilent» на рабочем столе, после чего открывается меню, представленное на рис. 2.9. В открывшемся меню, нужно перейти во вкладку «Scan and Log Data».

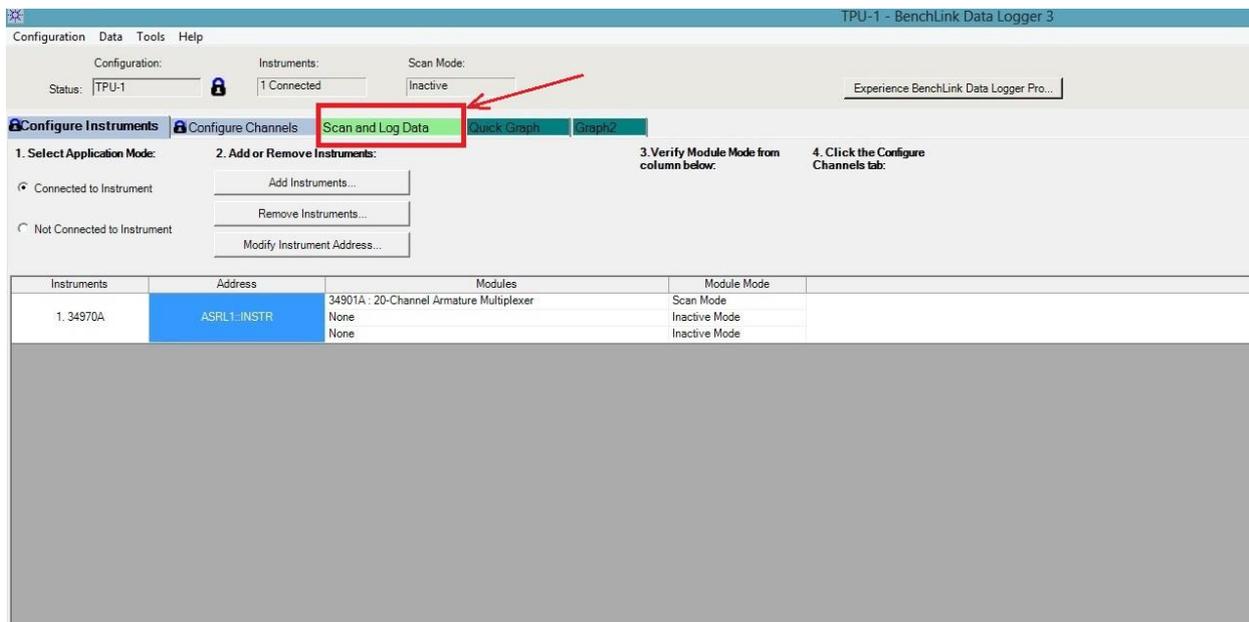


Рисунок 2.9 – Меню ПО «Agilent BenchLink DataLogger»

Во вкладке «Scan and Log Data» производится настройка регистрации параметров, а также осуществляется запуск системы регистрации (рис. 2.10). В меню настройки устанавливается интервал регистрации экспериментальных параметров, в зависимости от необходимости частоты фиксации значений.

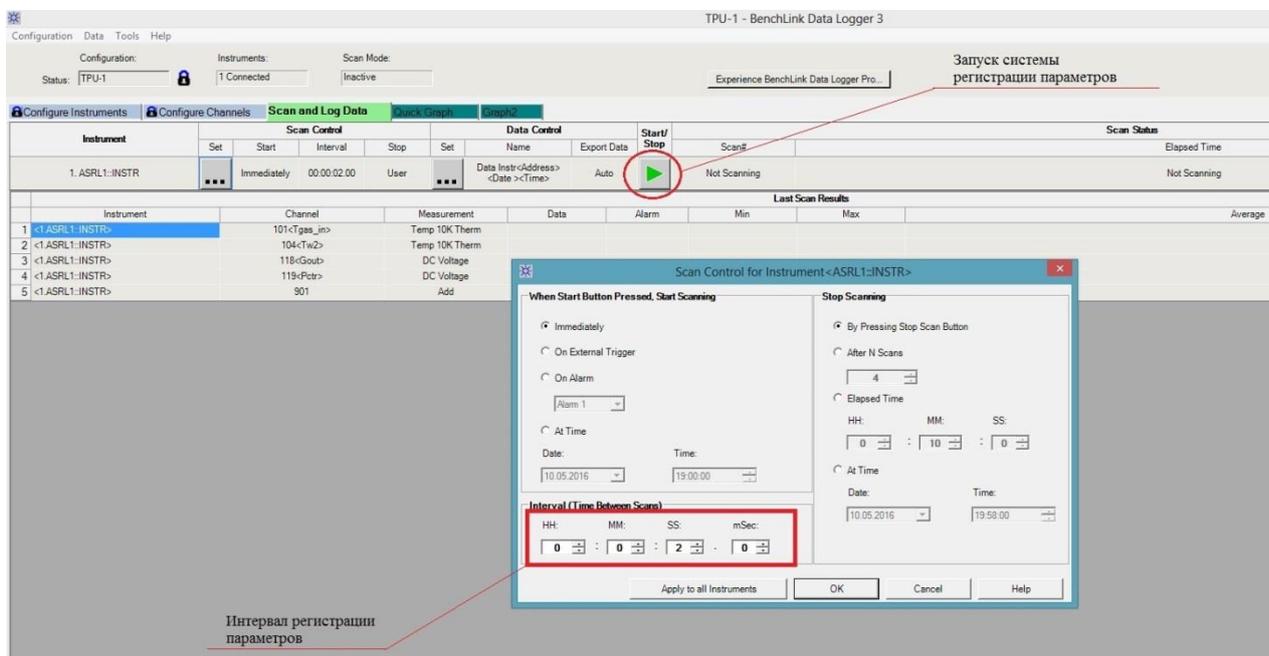


Рисунок 2.10 – Настройка и запуск ПО «Agilent BenchLink DataLogger»

После запуска программы начинается регистрация параметров. Для остановки необходимо нажать кнопку «Стоп» (рис. 2.11), после чего можно сохранить файл с измеренными значениями. Для сохранения результатов, после нажатия кнопки «Стоп», в открывшемся окне нужно нажать на кнопку «Export Data». В меню «Export Data» в поле «Format Options» выбрать в строке «Column Separator» параметр «Tab», а в строке «Decimal Symbols» параметр «Comma[.]» (рис. 2.12), после чего нажать кнопку «Export to File...» и выбрать место сохранения файла.

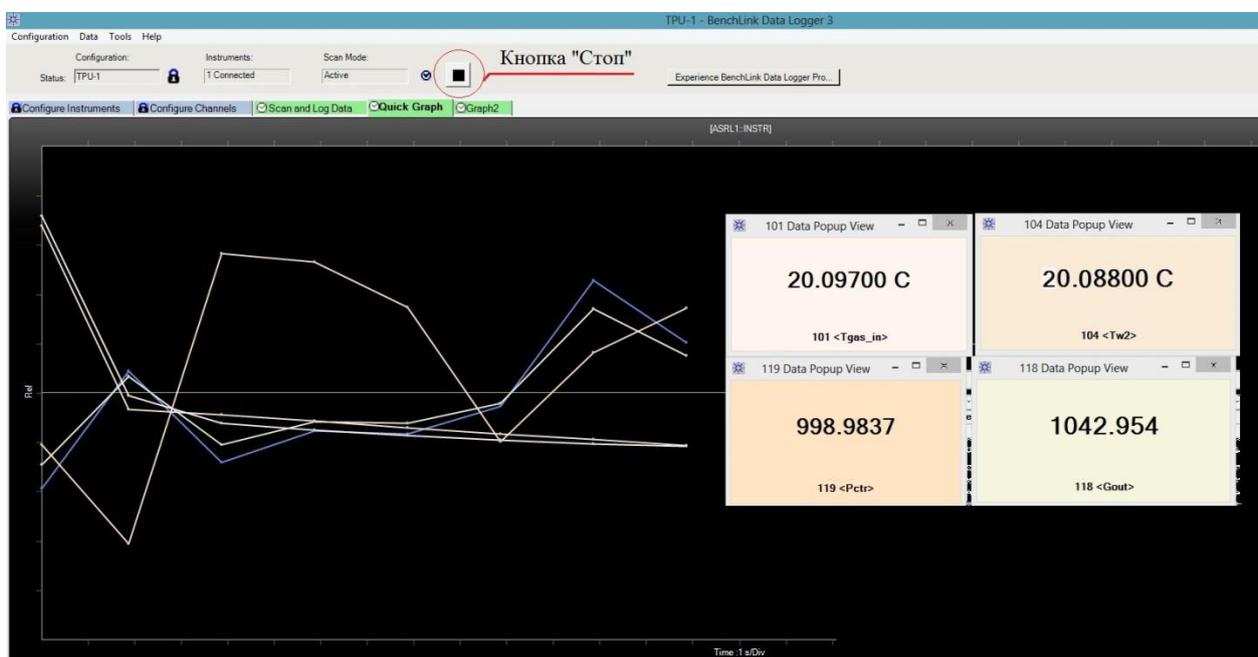


Рисунок 2.11 – Остановка регистрации параметров

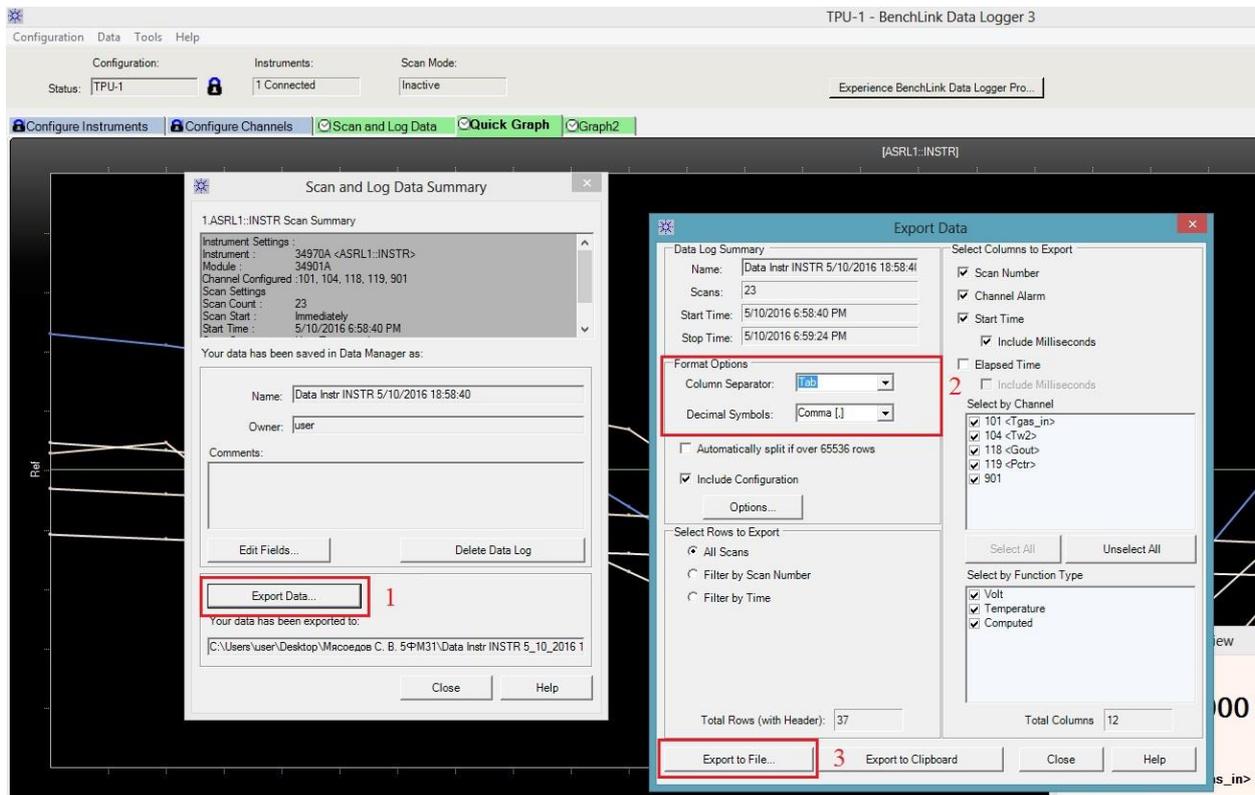


Рисунок 2.12 – Сохранение результатов.

2.2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проведены на установке [17] по изучению динамики испарения и конвективных течений в миканалах.

Концепция эксперимента представлена на рис. 2.13. Включает использование апробированных ранее [55] методов изучения тепломассопереноса через межфазную границу раздела жидкости и газа.

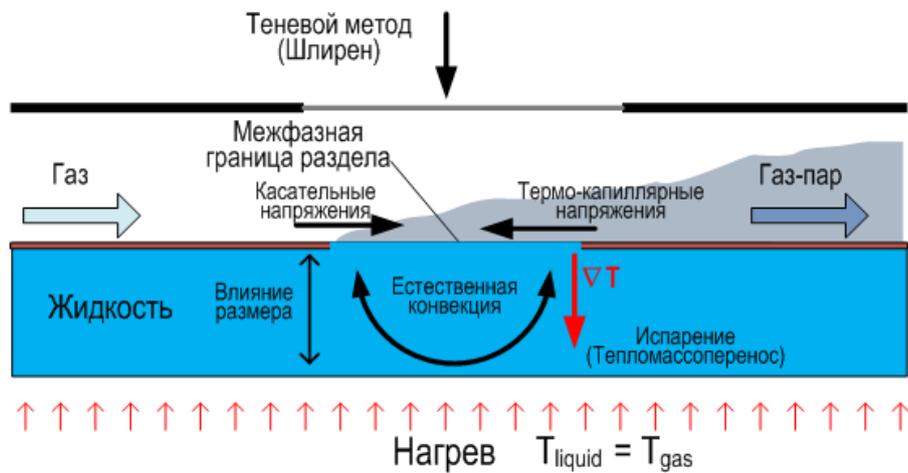


Рисунок 2.13 – Концепция эксперимента.

2.2.1. Принцип действия экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.14, основными элементами которой являются:

1. Рабочий участок.
2. Газовый и жидкостной контур: мембранный насос, регулятор расхода, расходомер, перистальтический насос.
3. Система термостабилизации: термостат, термоэлектрическая сборка.
4. Контрольно-измерительная система (ПК, регистратор данных, источники питания).
5. Шпирен система.

Экспериментальная установка работает в двух режимах: с неподвижным и подвижным слоем жидкости.

Работа направлена на исследование динамики испарения в подвижном горизонтальном слое жидкости под действием потока газа. При исследовании этих процессов принцип действия экспериментальной установки следующий.

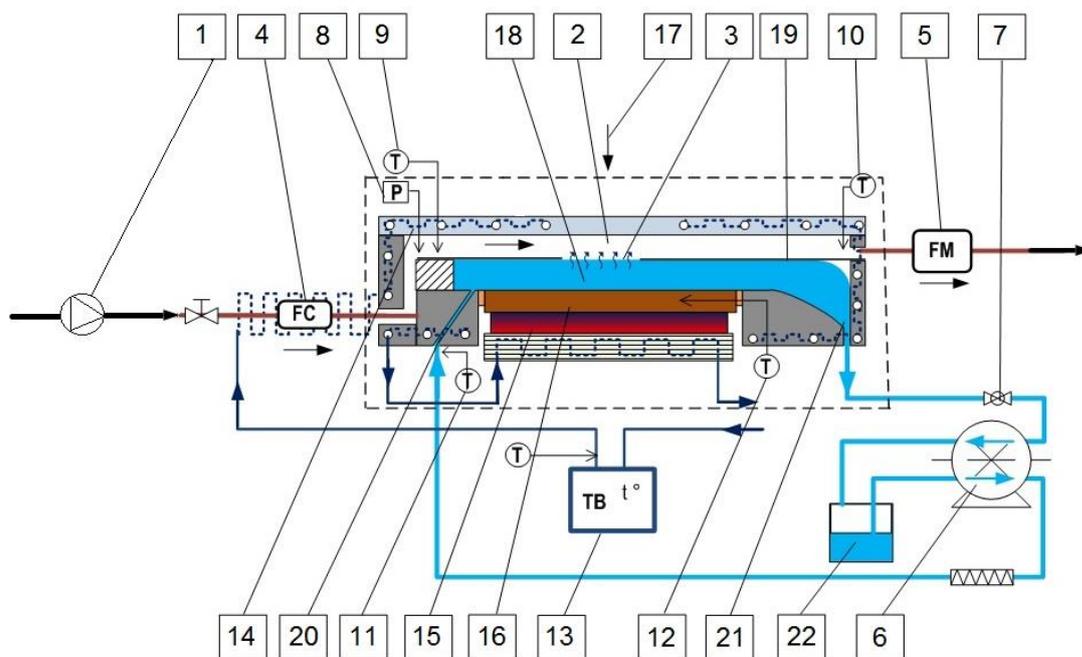


Рисунок 2.14 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – воздушный насос; 2 – газовый канал; 3 – локальная область испарения;
 4 – регулятор расхода; 5 – расходомер; 6 – перистальтический насос; 7 – вентиль;
 8 – датчик давления; 9, 10, 11, 12 – термисторы; 13 – термостат; 14 – каналы
 нагревающей (охлаждающей) жидкости; 15 – термоэлектрический модуль; 16 –
 медная пластина; 17 – Шлирен система; 18 – жидкостная камера; 19 – пластина
 из нержавеющей стали; 20 – сопло для подачи жидкости; 21 – канал для слива
 рабочей жидкости; 22 – емкость с рабочей жидкостью.

Фотокадр экспериментальной установки представлен на рис.2.15.

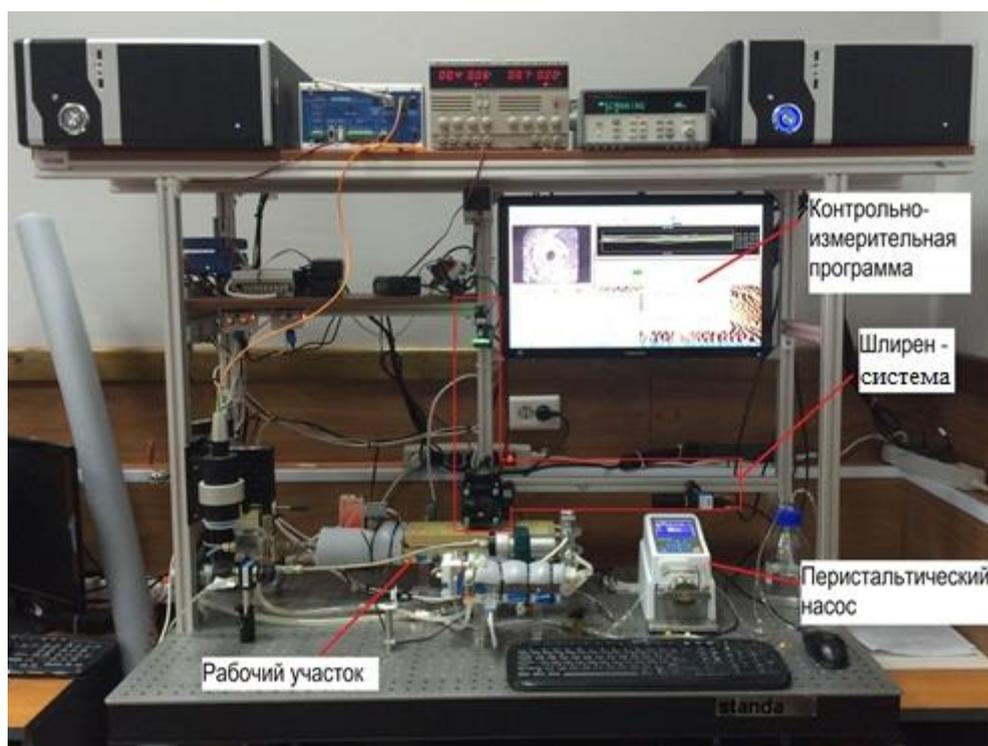


Рисунок 2.15 – Фотокадр экспериментальной установки.

Воздух с помощью мембранного насоса 1 поступает по газовому каналу 2 в рабочий контур, в котором находится локальная область испарения 3, где происходит взаимодействие жидкости с газом. После взаимодействия воздуха и этилового спирта, парогазовая смесь удаляется из экспериментального контура. Для контроля над расходом воздуха на входе в рабочий участок используется механический ротаметр 4. Расход воздуха, подаваемого в рабочий контур, регулируется с помощью изменения напряжения, поступающего на мембранный насос от источника питания. После взаимодействия с испаряющейся жидкостью количество парогазовой смеси измеряется расходомером 5 на выходе из рабочего участка. Диапазон изменения скорости потока газа от 100мл/мин до 1000 мл/мин ($Re=30-3000$). Использование перистальтического насоса 6 позволяет реализовать на рабочем участке движение слоя жидкости в направлении параллельном потоку газа, основная задача перистальтического насоса заключается в поддержании плоской межфазной границы, т.е. постоянного

уровня испаряющейся жидкости. Интервал изменения расхода жидкости от 0,03мл/мин до 100мл/мин. При закрытии вентиля 7 установка переходит в режим работы с неподвижным слоем жидкости. Давление газа измеряется датчиком 8. Для контроля за температурами газа и жидкости применяются термисторы 9-10 на входе в рабочий участок и термисторы 11-12 на выходе из рабочего участка. Стабилизация температуры газа осуществляется с помощью термостата 13, который прокачивает дистиллированную воду с заданной температурой по каналам 14. Область изменения температуры жидкости и газа от 20 до 50°C.

Изменение температуры испаряющейся жидкости осуществляется с помощью термоэлектрического модуля 15, который нагревает или охлаждает медную пластину 16. Контроль над положением поверхности раздела фаз осуществляется с помощью Шлирен системы 17 [6].

2.2.2. Рабочий участок

В подразделе представлено описание и технические характеристики рабочего участка экспериментальной установки.

Фотокадр рабочего участка представлен на рис.2.16.

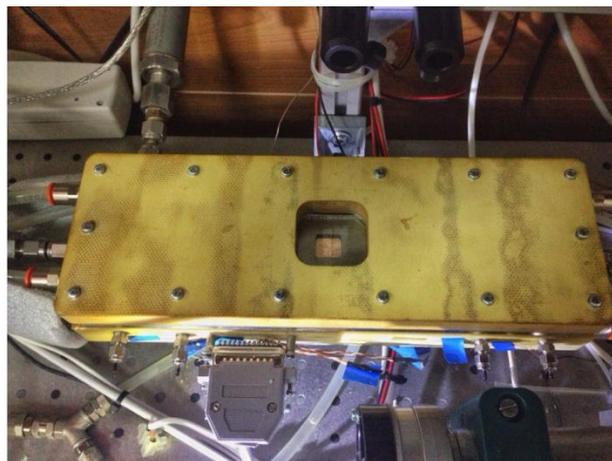


Рисунок 2.16 – Фотокадр рабочего участка.

Вид поперечного разреза рабочего участка представлен на рис.2.17.

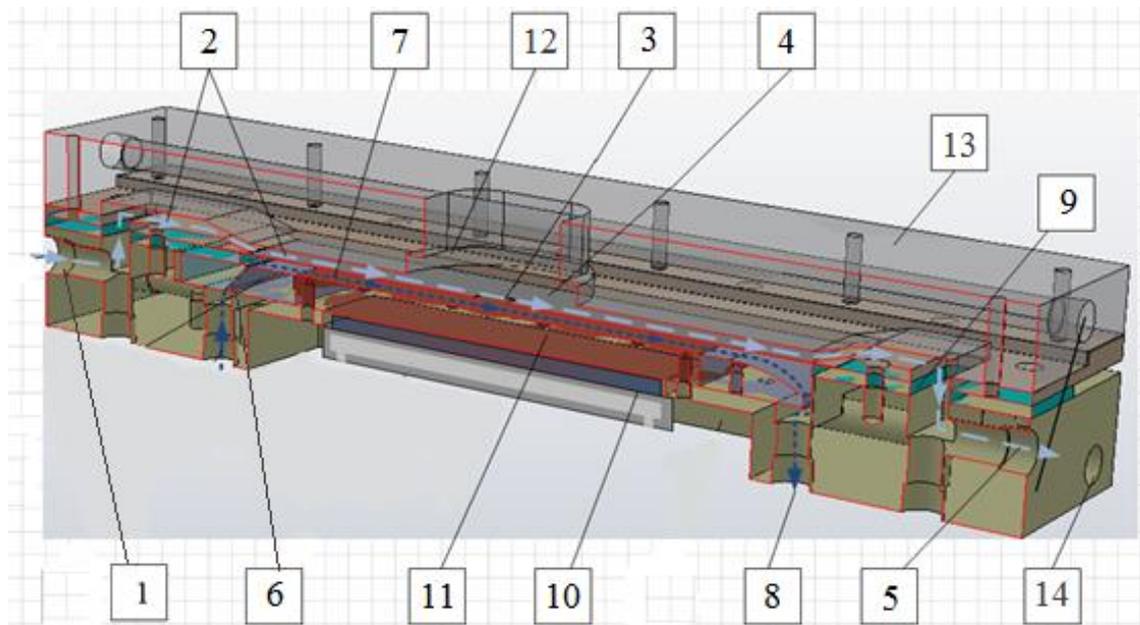


Рисунок 2.17 – Вид поперечного разреза рабочего участка.

1 – входной патрубок газового потока; 2 – газовый канал; 3 – зона испарения; 4 – пластина из нержавеющей стали; 5 – канал выхода парогазовой смеси; 6 – щелевое сопло; 7 – жидкостная камера; 8 – зона слива; 9 – вставка для формирования высоты жидкостной камеры; 10 – термоэлектрический модуль; 11 – медная пластина; 12 – оптическое окно; 13 – крышка; 14 – канал для воды.

Рабочий участок представляет собой жидкостную камеру 7 (шириной 40мм и изменяемой высотой от 1 до 10мм) и газовый канал 2 прямоугольного поперечного сечения (высотой 3мм, шириной 40мм, длиной 150мм). Высота жидкостной камеры от 1 до 10мм, осуществляется с помощью замены металлической пластины (рис. 2.18), которая разделяет потоки (жидкость - газ) и является верхней стенкой жидкостного канала.

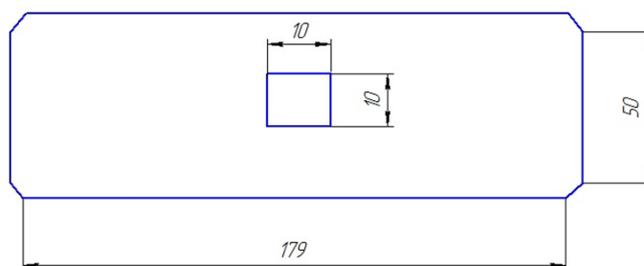


Рисунок 2.18 – Металлическая пластина с квадратным вырезом 10x10мм.

Сверху жидкостный канал ограничен пластиной 4 (рис. 2.17) из нержавеющей стали толщиной 200мкм с квадратным вырезом, в котором происходит взаимодействие движущейся жидкости с газом и формируется межфазная граница. Возможно применение пластин с разным размером выреза, тем самым изменяя локальную область испарения. Подача этилового спирта в жидкостную камеру происходит через щелевое сопло 6, проходя через камеру 7, этанол частично испаряется и попадает в зону слива 8, откуда откачивается в контейнер с исходной жидкостью.

Газ (воздух) поступает в рабочий участок через патрубок 1 и попадает в газовый канал 2 прямоугольного поперечного сечения. Далее он направляется в зону испарения 3, которая находится в квадратном вырезе пластины из нержавеющей стали 4. Затем, парогазовая смесь удаляется из рабочего участка через специальный канал 5. Температура жидкости контролируется термоэлектрическим модулем 10, в диапазоне температур от 20 до 50°С. Термоэлектрический модуль подключен к источнику питания, его мощность регулируется механически. Управление мощностью термоэлектрического модуля, который определяет температуру жидкости, осуществляется через ПИД регулятор. Температура воздуха на входе и парогазовой смеси на выходе из рабочего участка измеряется с помощью термисторов, которые установлены с использованием штуцеров и капиллярной трубки с запаянным концом. На поверхности термоэлектрического модуля установлена медная пластина 11. В ней равномерно по длине установлены термисторы. По центру крышки рабочего участка установлено прозрачное оптическое окно 12 с диаметром 120мм, через которое ведется визуализация межфазной границы с помощью теневой методики. Крышка рабочего участка 13 выполнена из текстолита. Выбор данного материала обусловлен тем, что он обладает антикоррозионными свойствами и не вступает в реакцию с газами и жидкостями.

2.2.3. Контрольно-измерительная система

Общая схема контрольно-измерительной системы представлена на рис.2.19, основными компонентами которой являются:

- ПК
- Контрольно- измерительная программа (КИП)
- Модули регистратора данных
- Модуль аналогового выхода
- ПИД регулятор мощности термоэлектрических модулей
- Источники питания для термоэлектрических модулей
- ПИД регулятор мощности теплового вентилятора.

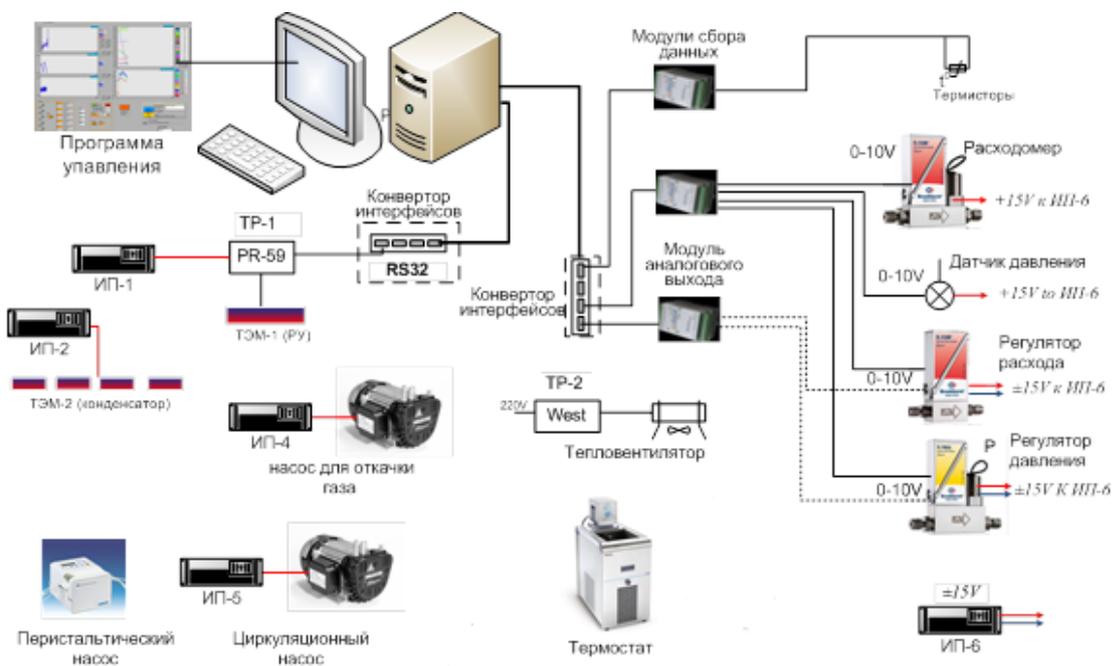


Рисунок 2.19 – Схема контрольно-измерительной системы.

Данные с контрольно-измерительных устройств передаются в ПК через контроллеры с частотой 1 раз в 2 секунды (при необходимости частота может быть изменена). Термисторы, расходомер, датчик давления, подключены к соответствующим модулям. Перистальтический насос подключен в сеть и управляется механически. Термостат, предназначенный для охлаждения горячей стороны термоэлектрических модулей, управляется механически. Мощность термоэлектрического модуля, который отвечает за температуру жидкости рабочего участка контролируется с помощью ПИД терморегулятора (ТР-1) в

автоматическом режиме. Этот терморегулятор подключен к ПК через конвертор интерфейсов. Управление терморегулятором происходит отдельно от модуля сбора данных с помощью отдельной программы, поставляемой производителем оборудования. Управление мощностью остальных термоэлектрических модулей происходит механически с помощью соответствующих источников питания.

2.2.4. Теневая система

Оптическая Шлирен система предназначена для измерения деформаций границы раздела газ-жидкость.

Шлирен система позволяет измерить деформацию поверхности косвенным способом. Она измеряет локальный угол наклона поверхности относительно плоскости перпендикулярной ее оптической оси. Угол наклона является первой производной от высоты поверхности вдоль выбранного направления. Таким образом, можно численно вычислить изменение высоты поверхности, на основании измеренного распределения угла наклона, методом численного интегрирования.

Визуализация уровня межфазной границы в зоне испарения осуществляется при помощи оборудования Шлирен системы (схема представлена на рис. 2.20).

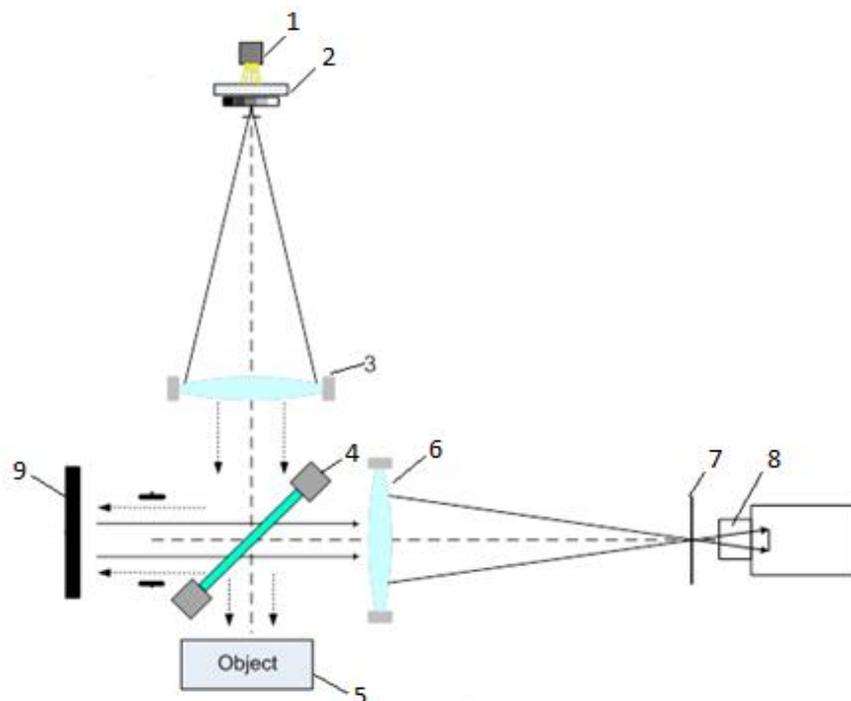


Рисунок 2.20 – Схема теневого метода.

1 – источник некогерентного света; 2 – матовое стекло; 3 – коллимирующая линза; 4 – делитель пучка; 5 – поверхность раздела “газ-жидкость”; 6 – шпирен линза; 7 – фокальная плоскость; 8 – объектив видеокамеры; 9 – линза.

В оптической Шпирен системе источник некогерентного света 1, матовое стекло 2 (используется для получения сферически распространяемого света) формировали световой поток со ступенчатым уменьшением интенсивности по пространству. Пучок света от источника 1 проходил через коллимирующую линзу 3, которая преобразовывала его в плоскопараллельный. Далее он отражался от делителя пучка 4. Часть света направлялась на поверхность раздела “газ-жидкость” 5. Отраженный от поверхности свет проходил через делитель пучка 4 (светоделитель) по направлению к шпирен линзе 6. Последняя фокусирует свет на фокальной плоскости 7. Прошедший через фокальную плоскость свет при помощи объектива 8 проецируется на сенсор видеокамеры. Для уменьшения влияния внешних источников света на измерения устанавливался непрозрачный щит в фокусе линзы 9.

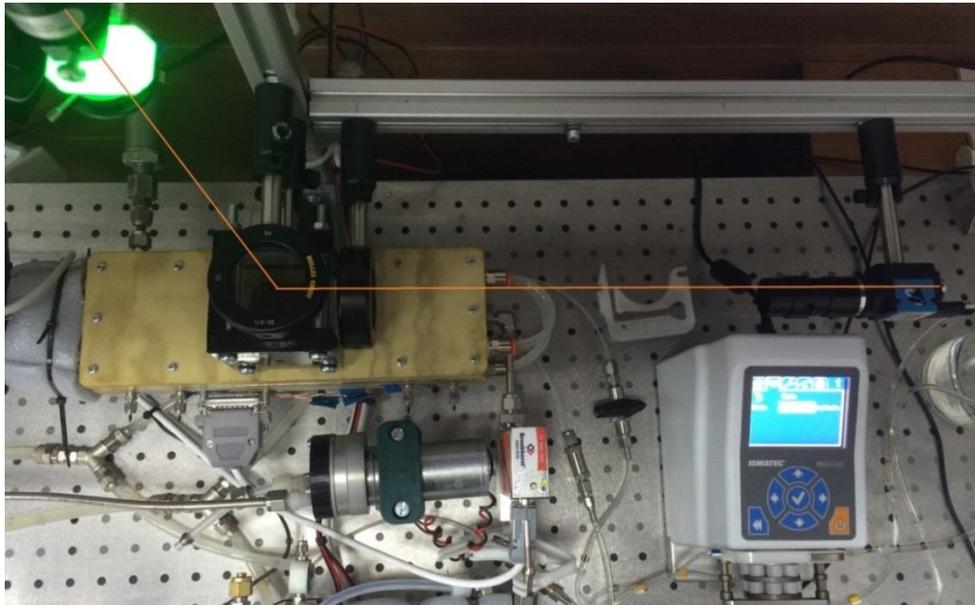


Рисунок 2.21 – Фотография теневого метода.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5ФМ41	Жаравину Захару Евгеньевичу

Институт	Энергетический	Кафедра	Теплоэнергетики и теплотехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	
<i>2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет.</i>	
<i>3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
<i>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ 2. Таблицы оценки вариантов проведения исследования 3. График проведения и бюджет НТИ</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А. А.	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Жаравин Захар Евгеньевич		

1. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Цель проекта - проведение научно-исследовательской работы согласно требованиям, отвечающим современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения, а также является экономическое обоснование научно-исследовательской работы.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательской работы;
- определение эффективности исследования.

Научно-исследовательская работа заключается в проведении серии экспериментов на специальном стенде с целью определения скорости испарения капель тонких слоев жидкости на поверхности цветных металлов, но проведение экспериментальных исследований требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

4.1. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Внешняя среда состоит из макро- и микроуровня. В настоящей работе макроуровень отсутствует. Рассмотрим микроуровень:

➤ **Спрос, характер спроса**

В настоящее время процессы тепломассопереноса в условиях испарения тонких слоев жидкости широко применяется в охлаждении промышленных энергетических аппаратов, электронных компонентов, при регазификации, а также в космических технологиях. Поэтому потенциальными клиентами могут быть:

- атомные и тепловые электростанции;
- химическая промышленность (при сушке жидких дисперсий (в пневматических, распылительных, роторных, барабанных, спиральных сушилках));
- машиностроительные компании и заводы (при разработке тепловых двигателей);
- компании по конструированию высокоинтенсивных теплообменных систем.

➤ **Конкуренты**

Конкурентами являются экспериментаторы и теоретики в области исследования процесса испарения капель.

➤ **Поставщики**

Поставщиками электронного оборудования и установки являются ООО “Физикон”, компания “KRUSS” и супермаркет цифровой техники “DNS”, компания ThorLabs.

➤ **Контактная аудитория**

Результаты исследования обращены к тем, у кого возник интерес к исследованиям тепломассообмена при возникновении испарения и кипения тонких слоев жидкости. А также различным фирмам, компаниям и заводам, деятельность которых связана с теплоэнергетикой.

➤ **Аудиторией влияния**

Аудиторией влияния являются руководители и сотрудники Томского Политехнического Университета.

Рассмотрим внутреннюю среду:

➤ **Проектный продукт и его характеристики**

Продуктом проекта будут результаты экспериментальных исследований, которые будут дополнением к теории тепло и массопереноса в условиях интенсивного испарения жидкости, в частности определение влияния температуры, материала поверхности и состава жидкости на скорость испарения,

коэффициент теплоотдачи. Также данные результаты могут быть положены в основу построения моделей и составления эмпирических зависимостей по процессу тепломассопереноса в условиях испарения.

➤ **Обеспеченность, потребность в основных средствах**

Основными средствами является: ЭВМ, программное обеспечение, фотокамера, стенд и установка.

➤ **Оборотный капитал**

Оборотный капитал отсутствует.

Таблица 4.1 – SWOT анализ

СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ «S» - Strengths	СЛАБЫЕ СТОРОНЫ «W» - Weaknesses
Возможность получения новых, никем ранее не полученных, результатов	Присутствие серьезных конкурентов
Применение полученных результатов в различных направлениях модернизации теплотехнических технологий в энергетике	Высокая стоимость оборудования
Новое высокотехнологическое оборудование	Большое количество дополнительных экспериментов
	Требуется много времени
ВОЗМОЖНОСТИ «O» - Opportunities	УГРОЗЫ «T» - Threats
Новые теоретические знания, научные термины	Появление новых, активных и целеустремленных конкурентов
Опыт проведения экспериментальных исследований	Большая погрешность измерений
Освоение нового оборудования и программного обеспечения	

4.2. Экспертная оценка

Как было сказано во второй главе, существует несколько методов расчета теплового потока с нагревательного элемента: по перепаду температур в двух различных сечениях по высоте пластины (метод 1), по расходу испарившейся жидкости (метод 2), по мощности выделяемого тепла на нагревательном элементе, как кулоновская теплота (метод 3).

Выбор метода расчета теплового потока влияет на многие факторы, в том числе и на точность анализа полученных результатов.

Проведение экспертной оценки поможет определиться с наилучшим для нашей научно-исследовательской работы методом обработки данных. Поэтому зададимся параметрами, по которым мы будем сравнивать методы.

Модель экспертной оценки построена по следующим параметрам:

1. Простота;
2. Точность;
3. Наглядность;
4. Отсутствие влияния внешних факторов;
5. Адаптированность к установлению зависимостей.

Три эксперта оценили параметры методов по 10-бальной шкале (10 – max) “Vi”, а также важность параметра по 5-бальной шкале (5 – max) “Pi”.

Таблица 4.2 – Методы расчета теплового потока с нагревательного элемента

№	Название метода
1	по перепаду температур в двух различных сечениях по высоте пластины
2	по расходу испарившейся жидкости
3	по мощности выделяемого тепла на нагревательном элементе

Таблица 4.4 – Оценка эффективности методов первым экспертом

Название метода	Простота	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей
Метод 1	7/1	10/5	8/4	6/4	6/4
Метод 2	6/1	5/5	10/4	4/4	4/4
Метод 3	7/1	7/5	10/4	5/4	6/4

Таблица 4.4 – Оценка эффективности методов вторым экспертом

Название метода	Простота	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей
Метод 1	4/4	10/5	6/5	5/5	8/5
Метод 2	8/4	6/5	9/5	2/5	6/5
Метод 3	7/4	7/5	9/5	3/5	8/5

Таблица 4.5 – Оценка эффективности методов третьим экспертом

Название метода	Простота	Точность	Наглядность	Отсутствие влияния внешних факторов	Адаптированность к установлению зависимостей
Метод 1	4/3	9/5	8/2	5/5	7/5
Метод 2	9/3	2/5	9/2	2/5	2/5
Метод 3	7/3	5/5	7/2	6/5	7/5

Для каждого метода определяем весовой коэффициент W_i , определяемый отношением $P_i/\sum P_i$, и оценку эффективности V_i*W_i .

Расчёт считается верным, если суммарный весовой коэффициент равен единице. Таким образом, весовой коэффициент W_i показывает долю важности каждого из параметров.

В таблицах 4.6 и 4.7 представлены значения весовых коэффициентов, оценки эффективности методов и итоговые экспертные оценки.

Таблица 4.6 – Весовой коэффициент и оценка эффективности методов

Эксперт	Метод	Простота		Точность		Наглядность		Отсутствие влияния внешних факторов		Адаптированность к установлению зависимостей	
		Wi	Vi*/Wi	Wi	Vi*/Wi	Wi	Vi*/Wi	Wi	Vi*/Wi	Wi	Vi*/Wi
1	метод 1	0,05	0,39	0,28	2,78	0,22	1,78	0,22	1,33	0,22	1,33
	метод 2		0,33		1,39		2,22		0,89		0,89
	метод 3		0,39		1,94		2,22		1,11		1,33
2	метод 1	0,16	0,67	0,21	2,08	0,21	1,25	0,21	1,04	0,21	1,67
	метод 2		1,33		1,25		1,88		0,42		1,25
	метод 3		1,17		1,46		1,88		0,63		1,67
3	метод 1	0,15	0,6	0,25	2,25	0,10	0,8	0,25	1,25	0,25	1,75
	метод 2		1,35		0,5		0,9		0,5		0,5
	метод 3		1,05		1,25		0,7		1,5		1,75

Таблица 4.7 – Итоговые экспертные оценки

Название метода	Первый эксперт	Второй эксперт	Третий эксперт	Средняя оценка
Метод 1	7,61	6,71	6,65	6,99
Метод 2	5,72	6,13	3,75	5,2
Метод 3	6,99	6,81	6,25	6,68

По результатам трех независимых экспертных оценок, самый худший результат у метода расчета по расходу испарившейся жидкости. Наивысшую среднюю оценку по предоставленным параметрам сравнения получил метод расчета по перепаду температур в двух различных сечениях по высоте пластины. Проанализировав данные результаты, принимаем для определения теплового потока данный метод.

4.3. Календарный план

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

В таблице 4.8 представлен перечень работ и участников в рамках проведения научного исследования.

Таблица 4.8 – Перечень работ и определение участников каждой работы

№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Выбор темы и направления проведения эксперимента	Руководитель, студент
2	Поиск статей на данную тематику, проведение обзора	Студент
3	Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	Руководитель, студент
4	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ дистиллированной воды	Руководитель, студент
5	Установка и подключение всего оборудования	Руководитель, студент
6	Установка (обновление) необходимого программного обеспечения	Руководитель, студент
7	Проведение эксперимента	Студент
8	Обработка результатов	Студент
9	Проведение дополнительных экспериментов с целью перепроверки неверных результатов и оценки повторяемости эксперимента	Студент
10	Обработка дополнительных результатов	Студент
11	Сравнение результатов с результатами, полученными ранее другими экспериментаторами, определение новизны и написание выводов	Руководитель, студент
12	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	Студент
13	Проверка проекта	Руководитель

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

Согласно Производственному календарю на 2016 год:

В 2016 году 365 календарных дней. При пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями будет 247 рабочих дней, включая 5 сокращенных на один час предпраздничных рабочих дней, и 118 выходных и нерабочих праздничных дней.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,4777.$$

Продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{pi} - продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях.

Рассчитанные значения в календарных днях округляем до целого числа.

Результаты расчетов сведем в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Продолжительность работ

№ раб.	Содержание работ	T_{pi}	T_{ki}	На- чало	Ко- нец
1	Выбор темы и направления проведения эксперимента	1	2	0	2
2	Поиск статей на данную тематику, проведение обзора	7	11	2	13
3	Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	3	5	13	18
4	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ дистиллированной воды	12	18	18	36
5	Установка и подключение всего оборудования.	1	2	36	38

6	Установка (обновление) необходимого программного обеспечения	1	2	36	38
7	Проведение эксперимента	30	45	38	83
8	Обработка результатов	10	15	83	98
9	Проведение дополнительных экспериментов с целью перепроверки неверных результатов и оценки повторяемости эксперимента	15	23	83	106
10	Обработка дополнительных результатов	5	8	83	91
11	Сравнение результатов с результатами, полученными ранее другими экспериментаторами, определение новизны и написание выводов	2	3	106	109
12	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	4	6	109	115
13	Проверка проекта	1	2	115	117

По таблице 4.9 построен график Ганта (рис. 4.1).

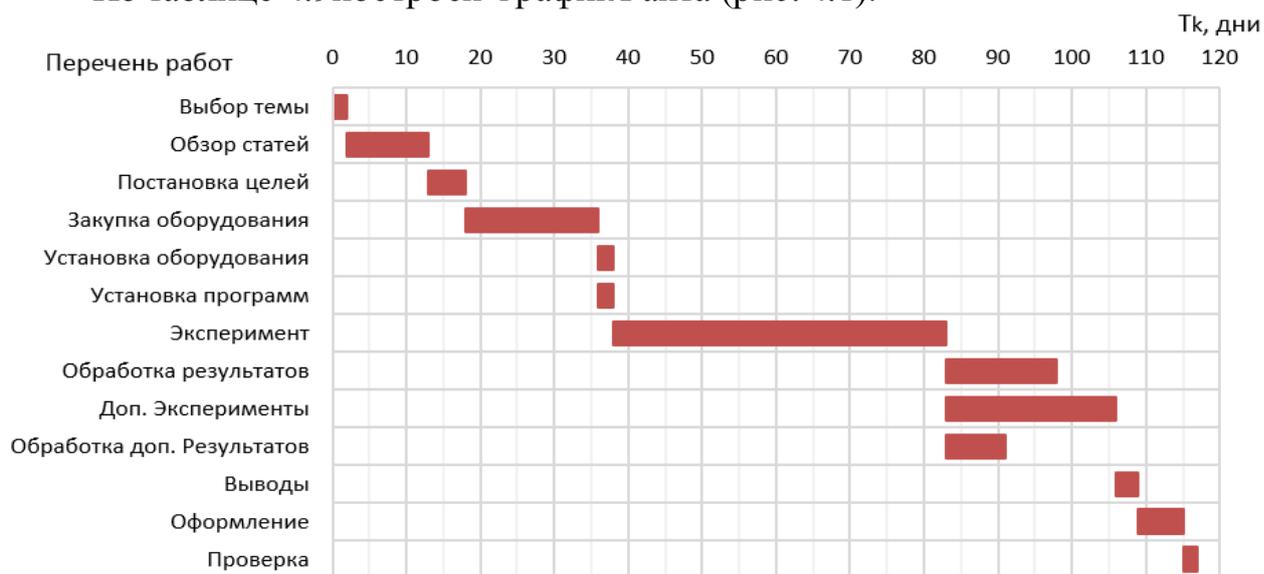


Рисунок 4.1 – График Ганта

Диаграмма расхода денежных средств не приводится, так как затраты выполнены только в день закупки.

4.4. Смета. Бюджет проекта

При планировании сметы проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы проекта используются следующие статьи затрат:

- материальные затраты проекта;
- затраты на электроэнергию;
- полная заработная плата руководителя проекта;
- амортизация.

Материальные затраты на проектные работы включают стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны материалы, необходимые для создания научно-технического стенда;
- оборудование для проведения эксперимента;
- продукции для обеспечения нормального технологического процесса или расходующихся на другие хозяйственные и производственные нужды (проведение экспериментов, контроль, эксплуатация оборудования и его ремонт);
- материалы, используемые в качестве объектов исследований;
- канцелярские принадлежности, ручки, бумага, картриджи и т.п.

Стоимость каждого материала определяется по формуле:

$$C = K Ц,$$

где K – количество (объем потребления), шт.;

$Ц$ – стоимость единицы материала, руб.

В таблице 4.10 приведены материальные затраты проекта.

Таблица 4.10 – Материальные затраты проекта

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.	затраты на электронику и прочие потребности светотехники
Нагревательный прибор, с выходными параметрами напряжения и тока «GW-Instek GPR-1820HD Single-Output DC Lab Power Supply Unit Linear PSU 18V 20Amp»	Шт.	16074	1	16074	
Фотоаппарат «Nikon D7100»	Шт.	63743	1	63743	
Объектив для фотокамеры «Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro Nikon F»	Шт.	32990	1	32990	
б) Источник света «edmund optics worldwide mi-150»	Шт.	6430	1	6430	
7) Компьютер intel core i7-2600k ОЗУ 16 гб	Шт.	39990	2	79980	
8) Монитор «Acer H236HLbmjd»	Шт.	9250	2	18500	
9) Клавиатура Gembird Wireless KB-315 Black	Шт.	970	2	1940	
10) Мышь Logitech M100 optical USB, черная	Шт.	349	2	698	
11) Термопары с Модулем ввода сигналов тензодатчиков Reallab NL-1SG	Шт.	9980	8	79840	
13) Уравнитель в горизонтальном и вертикальном направлении «GNL18/M - Large Goniometer, 44.5 mm Distance to Point of Rotation, ±5°, Metric»	Шт.	13984	1	13984	
14) Электронный магнитный уровень-угломер «ЗУБР ЭКСПЕРТ МИНИ 34745»	Шт.	3909	1	3909	
21) Клей Герметик МОМЕНТ силикон	Шт.	117	1	117	
22) Канцелярские товары (ручка, карандаш, линейка, ластик, тетрадь, +салфетки)	Шт.	500	1	500	
24) Электроэнергия	кВт/ч	4,25	11199	47596	
ИТОГО:				525614	

различного оборудования в течении проекта.

Расходы на электроэнергию представлена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на электроэнергию

Источник потребления	Мощность потребления, кВт/ч.	Количество часов работы	Общий расход, кВт
Освещение	$0,008*4*9=0,288$	$117*12=1404$	405
Компьютер	$0,4*2=0,8$	$96*12=1152$	922
Нагревательный прибор	5	$77*6=462$	2310
Фотоаппарат	5	$77*6=462$	2310
Источник света	5	$77*6=462$	2310

Амортизация - перенесение по частям стоимости основных средств и нематериальных активов по мере их морального или физического износа на стоимость производимой продукции (работ, услуг).

Таблица 4.12 – Амортизация

	Компьютер	Нагревательный прибор	Видео камера	Фото-аппарат	Источник света
Количество	2	1	2	1	1
Норма в год, %	20	20	20	20	20
Первичная стоимость	79980	16074	131678	63743	6430
Величина в год, руб.	3999	804	6584	3188	322
Количество работы оборудования в год, ч	$242*8+5*7=1971$	$62*8=544$	$161*8=1288$	$186*8=1488$	$186*8=1488$
Амортизация в час, руб/час	2,03	1,48	5,11	2,14	0,22
Количество часов работы в проекте	1152	462	462	462	462
Сам	2337,3	682,8	2361,6	989,8	100
Итого: (Σ Сам)	6556				

Оплата работы руководителя ВКР (магистранта) почасовая. Норма времени на руководство ВКР магистранта составляет 22 часа. В соответствии с временным положением о порядке нормирования труда научно-педагогических

работников, тариф на почасовую оплату работы доцента составляет 300 руб/час, а значит расходы на оплату труда определяются как:

$$C_{з.п.} = 22 \cdot 300 = 6600 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды $S_{с.н.} = 6600 \cdot 0,3 = 1980 \text{ руб.}$

Суммарные затраты составят: $C_{сум.} = 6600 + 3960 = 8580 \text{ руб.}$

Затраты на выполнение проекта приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Затраты на выполнение проекта

Наименование	См, руб.	Сз.п., руб	Сам., руб	Ссум., руб
Выполнение проекта	525614	8580	6556	540750

Общие затраты на реализацию данного проекта составят 540750 рублей.

4.5 Ресурсоэффективность

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 31, где исполнение 2 включает в себя использование сверхскоростной видеокамеры для научных исследований Phantom Mi90 M/R/LC310 стоимостью 1339477 рублей, вместо имеющейся фотокамеры D7100, а исполнение 3 характеризуется тем, что установка (стенд) уже собран и докупать оборудование не надо.

Таблица 4.14 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Материальные затраты проекта	525614	1801347	81396
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	8580	8580	8580
Накладные расходы (16 % от суммы ст. 1-2)	85471	289588	14396
Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1-3)	619665	2099516	104372

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I^1_{исп} = \frac{619665}{2099516} = 0,295 ; I^2_{исп} = \frac{2099516}{2099516} = 1 ; I^3_{исп} = \frac{104372}{2099516} = 0,05.$$

Таблица 4.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Скорость выполнения проекта	0,2	5	4	4
2. Финансовая возможность выполнения проекта	0,25	3	4	5
3. Точность результатов	0,25	5	4	4
4. Энергосбережение	0,10	2	2	2
5. Надежность	0,20	5	5	5
ИТОГО	1			

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{исп1}^p = 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,2 ;$$

$$I_{исп2}^p = 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,0 ;$$

$$I_{исп3}^p = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,25 .$$

Наиболее ресурсоэффективным оказалось исполнение 3. Так как отсутствовали затраты на специальное оборудование для экспериментов

4.6 Экономическая эффективность

В настоящей работе был проведен SWOT-анализ с исследованием внешней и внутренней среды проекта. Проведена экспертная оценка методов оценки формы лежащей капли, по результатам которой было решено использовать два метода: тангенциальный метод 1 и метод Юнга-Лапласа.

Определили структуру работ в рамках научного исследования, продолжительность и участников каждой работы. Построили график Ганта и диаграмму трудозатрат. График бюджета проекта не был построен, так как затраты были выполнены только в один день. Продолжительность выполнения проекта 117 календарных дней.

Затраты на выполнение проекта были рассчитаны в смете и составляют 540750 рублей, учитывая что оборудование не куплено и стенд не собран. Эти затраты включают в себя: материальные затраты (вместе с затратами на

электроэнергию), затраты на выплату заработной платы руководителю, затраты на амортизацию.

Интегральный показатель ресурсоэффективности проекта составляет 4,2. Но наиболее эффективным оказалось исполнение проекта №3. Отсутствовали затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ, так как установка (стенд) уже был собран и докупать оборудование не было необходимости.

. Актуальным вопросом в последнее время остается усовершенствование высокоинтенсивных теплообменных аппаратов.

Список публикаций

1) Кравчук А.С., Жаравин З.Е., Афанасьев И.А., Тупикова О.С. Динамический краевой угол при смачивании твердой подложки дистиллированной водой // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 472 с.

2) Е.Г. Орлова, Д.В. Феоктистов, З.Е. Жаравин .ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ РАСТВОРОВ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ В УСЛОВИЯХ ВАРИАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА // Теплофизические проблемы энергетических технологий – международная молодежная научная школа – семинар, 2014.

3) Жаравин З.Е., Афанасьев И.А., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Экспериментальные исследования испарения неподвижного слоя жидкости различной толщины обтекаемого потоком газа в миниканале прямоугольного сечения // Международная молодежная научная конференция - ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, 2016.