

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

Институт **Энергетический**

Направление подготовки **Физика (Физика и техника низких температур)**

Кафедра **Теоретической и промышленной теплотехники**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Испарение неподвижного слоя жидкости в мини-канале

УДК 532.529.5:536.423:536.241

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ41	Афанасьев Илья Александрович		

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		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

Физика, магистратура

Код результат а	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.

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

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика (Физика и техника низких температур)

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	Афанасьеву Илье Александровичу

Тема работы:

Испарение неподвижного слоя жидкости в мини-канале

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

Объект исследования – теплоперенос двухфазных систем. Предмет исследования – зависимости массовой скорости испарения от скорости потока газа, разности между температурами жидкости и газа и толщины слоя. Термодинамические параметры на поверхности раздела газа и жидкости.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

Анализ научных публикаций по тематике испарения тонких слоев жидкости под действием потока газа в мини- и микроканалах.

Разработка методики экспериментальных исследований по изучению процесса испарения неподвижной горизонтальной пленки жидкости (спирта), обтекаемой потоком газа (воздуха).

Проведение серии экспериментальных исследований по испарению неподвижного слоя жидкости, под действием потока газа.

Получение функциональных зависимостей массовой скорости испарения от скорости потока газа, разности между температурами жидкости и газа и толщины слоя.

Разработка методики по определению температуры поверхности слоя жидкости и коэффициента аккомодации.

Анализ полученных экспериментальных результатов.

Определение погрешностей экспериментальных исследований.

Перечень графического материала

Презентация (___ сл.)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко Аркадий Альбертович
Социальная ответственность	Антоневич Ольга Алексеевна
Раздел на иностранном языке	Крайнов Александр Валерьевич
Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Описание экспериментальной установки	
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	Афанасьев Илья Александрович		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 212 с., 81 рисунок, 30 таблиц, 85 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: двухфазные течения, массовая скорость испарения, тепломассоперенос, фазовый переход, конвекция, мини-канал.

Объектом исследования является тепломассоперенос двухфазных систем.

Цель работы – экспериментальное определение влияния толщины слоя жидкости, температуры двухфазной системы и расхода газа, движущегося параллельно неподвижному 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, разности температур $\Delta T = T_{ж} - T_{г}$ между жидкостью и газом» и скоростью потока воздуха. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными ранее. Также в работе определялись, температурный перепад на поверхности раздела «этанол–воздух» и коэффициенты аккомодации.

Полученные результаты могут быть использованы для расширения теоретические положений по изучению теплообмена в двухфазных потоках, что в свою очередь будет способствовать повышению эффективности оборудования, предназначенного для очистки, применяемого в технологической схеме 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 определённому 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 «СБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля»;
12. ГОСТ 12.4.124-83 «СБТ. 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.....	15
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ИСПАРЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА В МИНИ- И МИКРО-КАНАЛАХ	19
1.1 Моделирование процессов испарения под действием потока газа.....	19
1.2 Экспериментальные исследования процессов испарения под действием потока газа.....	34
1.3 Применение закона Герца-Кнудсена для расчета скорости испарения ...	55
Выводы по первой главе.....	59
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ИСПАРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА.....	67
2.1 Планирование экспериментальных исследований	67
2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента	67
2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований.....	67
2.1.3 Выбор области изменения основных факторов	69
2.1.4 Точность измерения основных параметров	70
2.2 Экспериментальная установка.....	70
2.2.1 Принцип действия экспериментальной установки.....	71
2.2.2 Рабочий участок	74
2.2.3 Контрольно-измерительная система.....	77
2.2.4 Теневая система.....	78
2.2.5 Методика проведения экспериментальных исследований	80
Выводы по второй главе.....	88

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА МАССОВУЮ СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ НЕПОДВИЖНОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА	90
3.1 Методика расчета расхода испарения с поверхности слоя жидкости, обдуваемого потоком газа	90
3.2.Свойства рабочей жидкости и газа.....	91
3.3 Анализ полученных зависимостей	94
3.3.1 Зависимость массовой скорости испарения от температуры системы «газ-жидкость»	94
3.3.2 Зависимость массовой скорости испарения от средней скорости потока газа	100
3.3.3 Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости	107
3.3.4 Сравнение экспериментальных данных	112
3.3.5 Определение погрешностей эксперимента	116
3.4 Расчет температуры поверхности.....	119
3.5 Расчет коэффициента аккомодации	125
Выводы по третьей главе.....	127
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	131
Введение.....	131
4.1 SWOT-анализ.....	132
4.2 Экспертная оценка	134
4.3 Календарный план.....	136
4.4 Смета. Бюджет проекта	140

4.5 Ресурсоэффективность	144
4.6 Экономическая эффективность	145
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	148
Введение.....	148
5.1 Производственная безопасность.....	149
5.1.1 Вредные физические производственные факторы	149
5.1.1.1 Освещенность рабочей зоны.....	149
5.1.1.2 Электромагнитные поля	150
5.1.1.3 Микроклимат помещения.....	152
5.1.1.4 Статическое электричество	155
5.1.2 Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды .	156
5.1.2.1 Электробезопасность	156
5.2 Экологическая безопасность.....	157
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	159
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА.....	164
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	165
Приложение А	173
Приложение Б	191
Приложение В.....	199

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие энергетической, химической, нефтехимической, топливной промышленности происходит с увеличением энергонасыщенности оборудования. Основной проблемой технологических установок данных областей производства является создание систем обеспечения теплового режима работы оборудования. Ее решением можно считать создание энергоэффективных систем, работа которых основана на фазовых переходах.

В топливной промышленности на газоперерабатывающих заводах получают природный газ с промыслов и производят продукты, отвечающие требованиям потребителей. Технология сжижения природного газа включает в себя следующие операции: очистка от CO_2 и H_2S , осушка, отделение тяжелых углеводородов, сжижение.

В газопереработке для очистки газа применяются следующие процессы разделения [1]:

- перегонка (компоненты разделяются за счет разной летучести);
- абсорбция (осуществляется контакт газа с жидким растворителем (абсорбентом) в целях удаления определенных компонентов);
- адсорбция (процесс разделения осуществляется на твердом сорбенте);
- мембранное разделение (используются различия в растворимости компонентов в материале мембраны и размерах молекул).

Контактные устройства в перегонных колоннах, абсорберах, и регенераторах предназначены для обеспечения контакта между разделяемыми фазами. Эти устройства относятся к одному из следующих типов:

- колпачковые тарелки;
- клапанные тарелки;
- ситчатые тарелки;
- нерегулярные насадки;

- регулярные насадки.

В первых промышленных перегонных колоннах применялись колпачковые тарелки. Через прорезы или отверстия в перфорированных колпачках пары барботировали сквозь жидкость. Такая перекрестно-восходящая схема движения обеспечивает хороший контакт между фазами. Скорость паров не должна быть достаточно высокой, чтобы не происходил унос жидкости. Скорость потока жидкости должна находиться в таких пределах, чтобы обеспечивать приемлемый уровень на тарелке и предотвращать подъем паров через перелив. Для поддержания минимального уровня жидкости предусмотрены сливные пороги.

В клапанных тарелках колпачки заменены частично перекрывающимися круглыми или прямоугольными прорезями с клапанами. По сравнению с колпачковыми клапанные тарелки обходятся дешевле и лучше перемешивают жидкость и пар, также в них меньше потери давления.

Конструкция ситчатых тарелок еще проще: они содержат лишь отверстия в тарелке. Восходящий поток пара предотвращает провал жидкости через отверстия в тарелке.

В насадочных колоннах контакт осуществляется преимущественно в нисходящем направлении, что обеспечивает меньшие диаметры, высоту, а также потери давления при сравнимой пропускной способности. Но насадочные колонны лучше работают при малых значениях отношения объемных расходов жидкости и пара (L/V), а тарельчатые наоборот. К недостаткам насадок можно отнести восприимчивость к загрязнениям твердыми частицами, что существенно ухудшает эффективность контакта, увеличивает потери давления.

В целом насадочные колонны являются более предпочтительными, так как у них меньше диаметр, высота и потери давления. Однако, если насадка не дает выигрыша в габаритах, более экономичным вариантом может оказаться тарельчатая колонна.

В перечисленных выше устройствах возникают двухфазные течения в процессе очистки природного газа от кислых примесей. Эффективность тепло- и массоотдачи будет зависеть от целого ряда факторов. В частности от скорости потока жидкости/газа, температуры жидкости/газа, а также физических свойств. Эти параметры будут определять силы, влияющие на эффективность механизмов переноса. Экспериментальных и теоретических работ недостаточно для более детального описания процессов тепло- и массопередачи. Последнее сдерживает развитие теплообменных систем. Проведение экспериментальных исследований позволит создать научные основы для конструирования энергоэффективных аппаратов по сравнению с существующими.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по влиянию температуры, толщины слоя жидкости, скорости потока газа, движущегося параллельно слою неподвижной жидкости, на скорость испарения при условиях формирования устойчивой плоской межфазной поверхности раздела «жидкость-газ». Полученные результаты внесут вклад в развитие теории испарения тонких слоев жидкостей.

Целью работы являлось экспериментальное определение влияния температуры, толщины слоя жидкости, скорости потока газа, движущегося параллельно слою неподвижной жидкости, на скорость испарения при условиях формирования устойчивой плоской межфазной поверхности раздела «жидкость-газ».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение анализа научных публикаций на тему испарения тонких слоев жидкости в мини- и микро-каналах под действием газового потока.
2. Разработка методики экспериментальных исследований массовой скорости испарения неподвижного слоя жидкости (спирта), обтекаемого потоком газа (воздуха) в мини-канале.

3. Определение влияния разницы температур $\Delta T = T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}$ между жидкостью и газом в условиях: $T_{\text{г}} > T_{\text{ж}}$, $T_{\text{г}} = T_{\text{ж}}$, $T_{\text{г}} < T_{\text{ж}}$ на скорость испарения.
4. Определение экспериментальных зависимостей массовой скорости испарения от скорости потока газа, толщины слоя жидкости.
5. Определение температуры на поверхности жидкости в условиях проведения экспериментальных исследований.
6. Определение коэффициента аккомодации.
7. Определение погрешностей экспериментальных исследований.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕМАТИКЕ ИСПАРЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ГАЗА В МИНИ- И МИКРО-КАНАЛАХ

1.1 Моделирование процессов испарения под действием потока газа

В работе [4] рассматривалась двумерная модель установившегося ламинарного течения пленки жидкости и спутного потока газа в канале.

Рассчитанные относительные толщины пленки вдоль канала при различных коэффициентах теплоотдачи и при различных касательных напряжениях представлены на рис. 1.1, а, б.

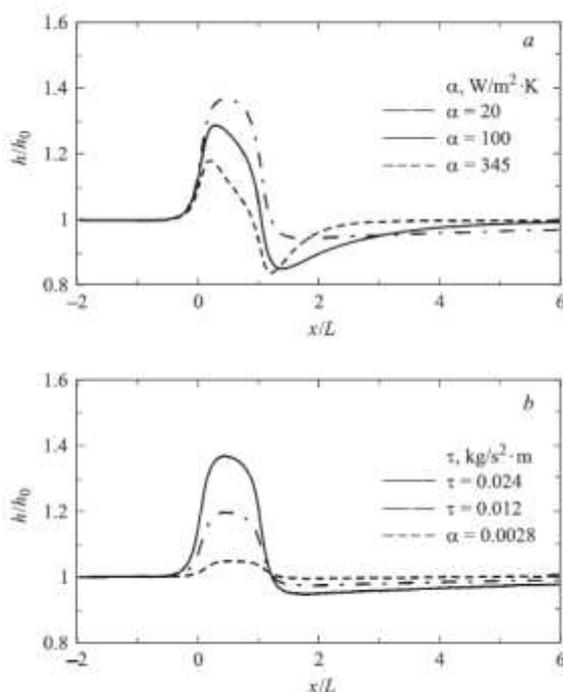


Рисунок 1.1 – Термокапиллярная деформация пленки FC-72, $T_a=T_0=17$ °C, $L = 6,7$ мм, $Re = 1$, $q = 1000$ Вт/м², $\varphi = 0$ градус, нагреватель расположен от 0 до 1 по оси абсцисс, а – для различных коэффициентов теплоотдачи, $h_0 = 0,00017$ м, $\tau = 0,024$ кг/с²м, б – для различных касательных напряжений, $\alpha = 20$ Вт/м²К [4]

Термокапиллярное касательное напряжение направлено навстречу основному потоку жидкости в следствие положительного градиента температуры. Следует отметить увеличение толщины пленки в области

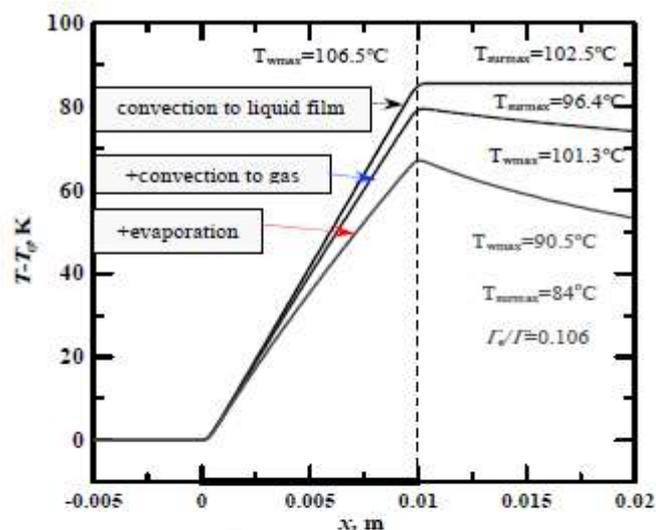
нагревательного элемента, а температура поверхности жидкости за нагревателем, вдоль по потоку, убывает.

В работе [5] исследовалось влияние испарения на теплообмен в локально-нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в мини-канале.

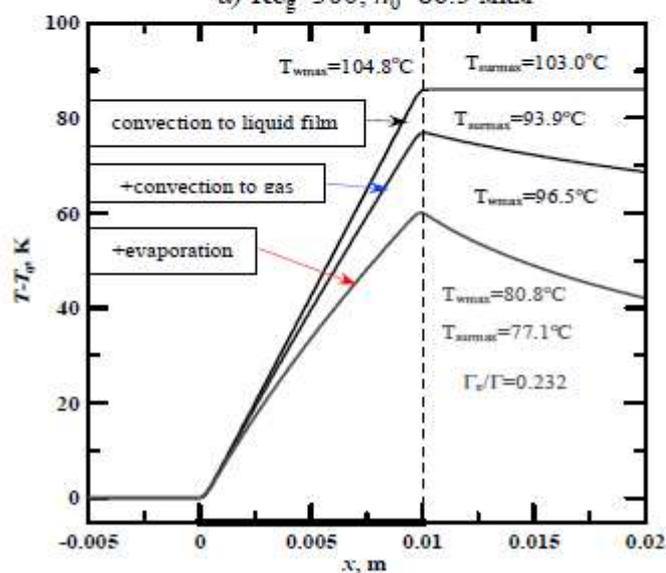
Стационарное двумерное течение испаряющейся пленки жидкости и газа в канале описывается уравнениями Навье-Стокса, неразрывности, энергии и конвективной диффузии. В рамках указанной модели рассматривается задача тепло- и массообмена для недеформируемой пленки жидкости и потока газа.

Результаты расчетов показали, что испарение оказывает существенное влияние на теплоотвод от локального источника нагрева. Интенсивность испарения зависит от выхода теплового пограничного слоя на поверхность пленки.

Результаты, представленные в работе [5], нацелены на анализ интенсификации теплообмена от локального источника тепла. Интенсивное испарение начинается после выхода теплового пограничного слоя. Чем тоньше пленка, тем быстрее выходит на поверхность пленки тепловой пограничный слой. Толщина пленки может регулироваться числом Рейнольдса газового потока, а также высотой канала (рис. 1.2).



a) $Re_g = 300, h_0 = 86.5 \text{ мкм}$



б) $Re_g = 1200, h_0 = 46.4 \text{ мкм}$

Рисунок 1.2 – Распределение температуры на границе раздела $H_2O - N_2$ [5]

На рис. 1.2 можно наблюдать зависимости, отображающие влияние механизмов переноса в процессе охлаждения локального нагревателя (микроэлектронного чипа). Расчеты выполнялись для трех случаев:

- 1) конвекция в пленке жидкости;
- 2) конвекция в пленке жидкости и газе;
- 3) испарение и конвекция в пленке жидкости и газе.

Присутствие испарения снижает температуру нагревателя на $16^\circ C$ (рис. 1.2, а) и $24^\circ C$ (рис. 1.2, б) при данных условиях.

Начало интенсивного испарения зависит от длины нагревателя. Если размер нагревателя относительно мал и пленка относительно толстая, то

тепловой пограничный слой не успевает выйти на поверхность на участке нагревателя и процесс испарения происходит менее интенсивно (рис. 1.3).

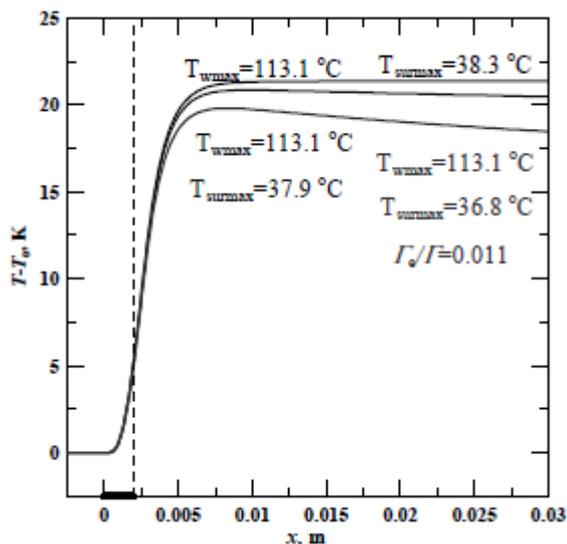


Рисунок 1.3 – Тепловой пограничный слой не достигает поверхности пленки на участке нагревателя: $T_0 = 17 \text{ °C}$, $\varphi = 0$ градус, $q = 50 \text{ Вт/см}^2$, $Re = 10$, $Re_g = 200$, $h_0 = 194,2 \text{ мм}$, $H = 1 \text{ мм}$, $L = 2 \text{ мм}$ [5]

Можно сделать вывод, что для фиксированной высоты канала увеличение расхода газа ведет к утончению пленки при постоянном расходе жидкости, и способствует отведению большего количества тепла с нагревателя за счет испарения. Однако, в таких тонких пленках жидкости существует высокая вероятность разрыва.

Целью работы [6] являлась разработка упрощенной аналитической модели теплопередачи для ламинарного режима течения пленки жидкости, стекающей по локально-обогреваемой твердой поверхности с учетом воздействия на пленку движущегося газа и теплопереноса в жидкости в направлении течения.

Условия рассматриваемой задачи: течение пленки двумерное, стационарное, ламинарное; вязкая жидкость с толщиной слоя h на пластине, которая образует угол θ с горизонтом и имеет локально-обогреваемый участок длиной l . Поверхность жидкости контактирует с движущимся неограниченным потоком газа. Воздействие газового потока на движение

пленки жидкости учитывается заданным касательным напряжением на межфазной поверхности τ_s . Расчеты выполнялись в декартовой системе координат с применением следующих упрощающих предположений:

- на участке нагрева ($0 < x < l$) задана плотность теплового потока в жидкость j ;
- вне участка нагрева (при $x < 0$, $x > l$) поверхность пластины теплоизолирована;
- при $x \rightarrow \pm\infty$ жидкость и пластина находятся в тепловом равновесии с газом, т. е. температура пленки, температура окружающего газа и температура пластины равны T_g ;
- газ занимает область $y > h$, воздействие газового потока на движение пленки жидкости учитывается заданным касательным напряжением на межфазной поверхности;
- теплообмен на поверхности пленки определяется законом Ньютона.

Коэффициент теплообмена между жидкостью и газом, а также тепловой поток в пленку жидкости на обогреваемом участке пластины задавались.

На рис. 1.4 приведены расчетные зависимости температуры жидкости на поверхности нагрева $T(x, 0)$ для вертикальной пленки и противоточного движения газа при $l = 100$; $Bi = 0,1$; $Pe / Pr = 1$ (при постоянной толщине пленки жидкости).

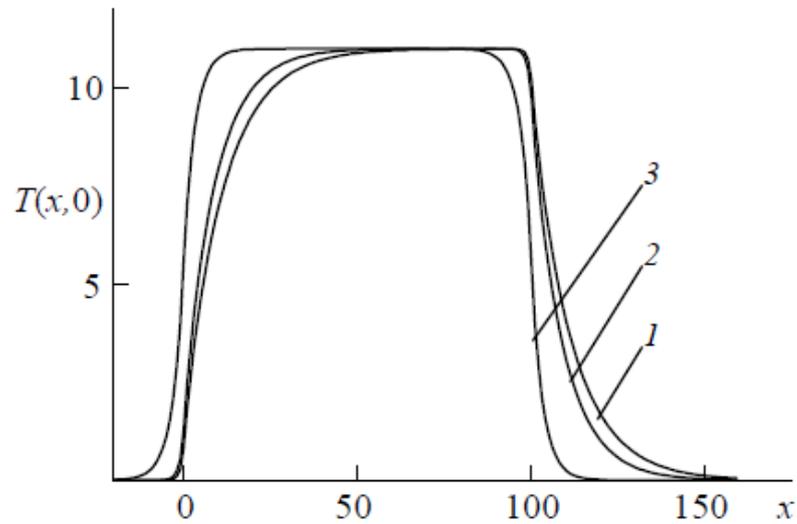


Рисунок 1.4 - Температура жидкости на поверхности нагрева 1: $Re = 1$; 2: $Re = 0,75$; 3: $Re = 0$ [6]

При большой длине участка нагрева и умеренных значениях $Re < 1$, температура жидкости достигает равновесного значения $T^* = 1/Bi + 1$ вблизи передней кромки нагревателя. Далее температура постепенно уменьшается. Расход жидкости оказывает влияние на «протяженность теплового следа». При меньших значениях Re происходит уменьшение зоны нагрева до равновесной температуры, а также протяженность «теплового следа». При $Re=0$ область нагретой пленки почти совпадает с участком нагрева.

Авторами работы [7] рассматривался поток пленки жидкости, обдуваемой потоком газа в мини-канале с нагревателем, расположенным в нижней стенке.

Исследования проводились для канала прямоугольного поперечного сечения, высотой H , которая намного меньше его ширины B . Течение вязкой несжимаемой пленки жидкости происходит за счет касательных напряжений, вызванных газовым потоком, а также за счет действия силы тяжести, так как канал расположен под углом φ относительно горизонтальной плоскости, как показано на рис. 1.5:

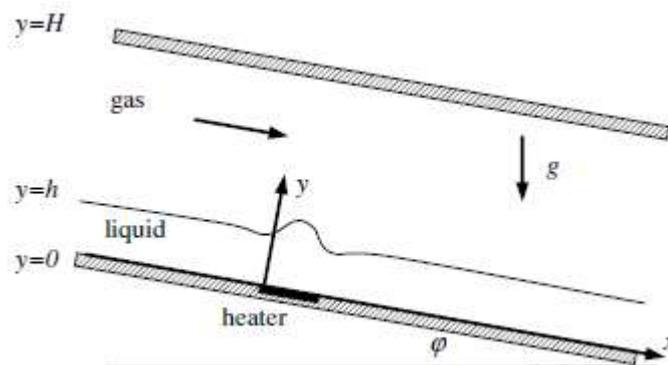


Рисунок 1.5 – Геометрическая постановка задачи [7]

В условиях данной задачи рассчитывалась двумерная модель слабо нагреваемой пленки жидкости.

Получено распределение температуры на поверхности пленки FC-72 при различных числах Рейнольдса для потока жидкости и толщины слоя ($Re=1$, $h=0,17$ мм; $Re=5$, $h=0,35$ мм; $Re=10$, $h=0,47$ мм). Положение максимума температуры смещается вниз с увеличением числа Re . Влияние конвективного механизма передачи тепла выражается более явно при относительно высоких значениях числа Рейнольдса жидкостного потока (начиная со значения $Re=4,5$). Отличный от нуля градиент температуры на поверхности пленки указывает на наличие термокапиллярного эффекта, так как происходит деформация в соответствии с эффектом Марангони. Также при моделировании учитывалось испарение. Предполагалось, что скорость газа в 2-3 раза выше, чем скорость жидкости, и что в газовой и жидкой фазах будет преобладать ламинарный режим течения. Установлено, что интенсивное испарение начинается, когда тепловой пограничный слой достигает поверхности пленки.

Численный анализ показал, что эффект испарения влияет на распределение температуры: появляются термокапиллярные силы на поверхности раздела газ-жидкость. Явления переноса (конвекция жидкости и газа, испарение) выражены наиболее сильным образом в относительно тонких пленках. Тепловой поток на входе зависит от толщины пленки,

которую можно регулировать с помощью скорости газового потока или высоты жидкостного канала.

В работе [8] авторами рассматривалась двухфазная система жидкость-газ. Газовая фаза представляла смесь газа и паров жидкости. На рис. 1.6 представлена геометрическая постановка задачи:

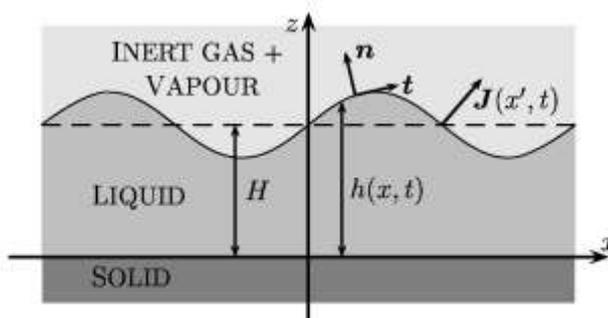


Рисунок 1.6 – Геометрическая постановка задачи [8]

Рассматривались диффузия в газовой фазе и испарение с поверхности жидкости. В соответствии с классическим уравнением Герца-Кнудсена можно пренебречь диффузией и рассчитать массовую скорость испарения. В условиях испарения без учета диффузии, частицы, расположенные выше, испаряются быстрее и происходит деформация поверхности раздела. Если учитывать только диффузию, то газ насыщается парами жидкости и скорость испарения можно задать с помощью закона Фика.

В опытах [9] изучались режимы, при которых диффузионное испарение ограничено. В работе [8] рассматривается система, описывающая изменение высоты профиля h паров, образующихся при протекании тонкой пленки по подложке и диффузия этих паров в газовой фазе. В соответствии с результатами экспериментов, предсказан порог неустойчивости и проведена классификация этого явления для различных жидкостей.

В работе [10] проводилось математическое и численное моделирование конвекции в горизонтальном слое жидкости под действием потока газа. На рис. 1.7 представлена геометрическая постановка задачи:

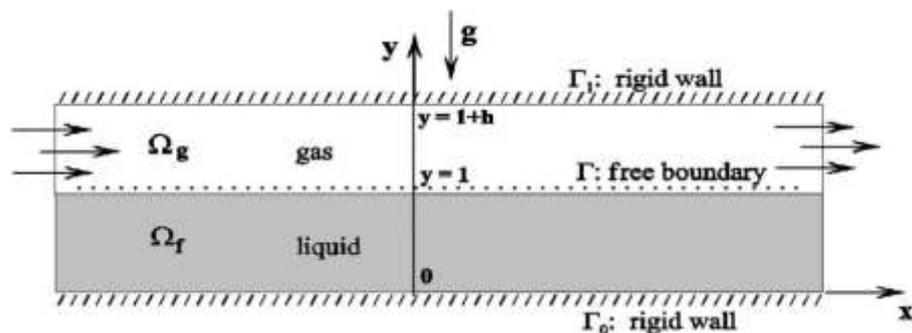


Рисунок 1.7 – Геометрическая постановка задачи [10]

Численно исследовалось влияние таких параметров, как скорость газа, температура. В качестве рабочей жидкости использовался этанол, в качестве газа – азот. Расчеты проводились в условиях земной гравитации ($g = g_0 = 10 \text{ м/с}^2$), слабой гравитации ($g = 10^{-1} g_0 = 1 \text{ м/с}^2$), микро-гравитации ($g = 10^{-2} g_0 = 10^{-1} \text{ м/с}^2$, $10^{-3} g_0 = 10^{-2} \text{ м/с}^2$, $10^{-4} g_0 = 10^{-3} \text{ м/с}^2$) и теоретической невесомости ($g=0$). Значения ускорения свободного падения в условиях микро-гравитации приняты в соответствии с параметрами на Международной космической станции и на беспилотных спутниках-роботах.

Построены зависимости профилей скорости газа, температуры газа/жидкости в безразмерных величинах от поперечной координаты в различных условиях гравитации, описанных выше. Полученные точные решения, позволяют изучить термокапиллярную конвекцию на свободной границе между жидкостью и спутным потоком газа с учетом эффекта испарения. Результаты, представленные в работе [10] отображают влияние различных механизмов конвекции в условиях микро-гравитации. Движение свободной границы может происходить в направлении противоположном движению потока газа. Главным достижением исследования является возможность аналитически контролировать механизмы конвекции под действием силы тяжести и в условиях микро-гравитации с использованием спутного потока газа.

В статье [11] исследовалось движение испаряющейся тонкой пленки жидкости в микро-канале под действием потока газа. Разрабатывалась трехмерная нестационарная математическая модель для совместного

движения локально-нагреваемой пленки жидкости и спутного потока газа. Эта модель учитывала деформацию поверхности контакта газ-жидкость, конвективный теплообмен в жидкой и газовой фазах, а также температурную зависимость поверхностного натяжения и вязкости жидкости.

Расчеты выполнены для постоянной высоты канала H_c и теплового потока q , которые равны 250 мкм и 1 Вт/см², соответственно. Канал ориентирован горизонтально, то есть угол наклона α равнялся 0. Число Рейнольдса газового потока варьировалось от 5 до 50, при движении жидкости $Re=1$. Эти параметры соответствуют начальным изменениям толщины пленки в диапазоне от 32,7 до 74,3 мкм. Размер нагревателя был постоянным во всех расчетах и равнялся 2x12 мм² (длина·ширина). Длина исследуемой системы «газ-жидкость» 1 содержит 5-10 длин нагревателя по направлению движения потока.

В качестве рабочих тел в мини-канале использовались вода и азот. Газ двигался параллельно жидкости в направлении оси абсцисс. Левая сторона нагревателя находится в начале системы координат. Начальная температура системы «газ-жидкость» принята 20°C. На рис. 1.8 представлена геометрическая постановка задачи:

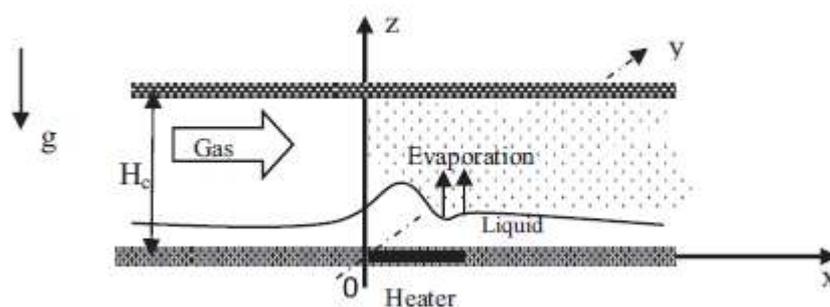


Рисунок 1.8 – Геометрическая постановка задачи [11]

Влияние скорости газа на концентрацию пара:

Установлено, что наиболее интенсивное испарение происходит на поверхности раздела газ-жидкость в зоне нагревательного элемента. Основными движущими механизмами газовой фазы являются диффузия и

вынужденная конвекция. Пар перемещается за счет диффузии, которая преобладает при низких значениях чисел Рейнольдса газового потока, в направлении верхней стенки. Максимум концентрации паров уменьшается с увеличением Re_g . Испарение происходит более интенсивно при повышении Re_g , также увеличивается массовая доля влаги в газовой фазе. Локальный максимум концентрации паров находится вблизи второго края нагревательного элемента в направлении потока. При малых Re_g концентрация паров стабилизируется довольно быстро после нагревателя (на расстоянии около 3-5 мм), а при значениях $Re_g > 50$ расстояние, на котором происходит стабилизация составляет около 20 мм. Для микро-каналов высотой 250 мкм расстояние стабилизации на порядок выше, чем величина нагревателя.

Распределение температуры в газовой и жидкой фазах:

Расчеты выполнялись при $Re_g = 5; 15; 50$, все остальные параметры поддерживались постоянными. Выделено три механизма передачи тепла: вынужденная конвекция, теплопроводность и диффузия. Термический пограничный слой сформировался в газовой фазе и наиболее ярко выражен при $Re_g > 15$. Из-за влияния теплопроводности тепловые потоки двигались вверх в слое жидкости при любых значениях Re_g . При малых значениях Re_g тепловой пограничный слой имел S-образную форму и достигал верхней стенки канала в самом начале нагревательного элемента. Максимум безразмерной температуры уменьшался с увеличением Re_g и расположен вблизи нижней границы нагревателя. Стабилизация температуры в слое жидкости происходила гораздо быстрее, чем в слое газа. При $Re_g = 5$ температура стабилизируется на расстоянии около 5-7 мм после нагревателя, а при $Re_g = 50$ около 20 мм.

Деформация поверхности раздела:

Появление валика пленки на переднем крае нагревателя присуще для всех значений Re_g , его вершина расположена немного выше (около 0,5 мм), относительно переднего края. Это явление вызвано термокапиллярным

эффектом за счет интенсивного нагрева и температурного градиента в пленке жидкости [12].

В исследовании [13] установлено, что связь между испарением и термокапиллярной конвекцией оказывает сильное влияние на термогидродинамическое поле жидкости при обдувании ее потоком инертного газа. Скорость испарения сильно зависит от распределения пара в газовой фазе. Когда граница паровой фазы достигает заданного устойчивого состояния, суммарное испарение почти не меняется на поверхности под действием теплового потока. Это можно использовать при проектировании и оптимизации усовершенствованных испарителей для охлаждения электронных устройств.

Исследования проводились при трех скоростях потока: 1 л/мин, 4 л/мин и 8 л/мин. Средние скорости газа на выходе из рабочего участка варьировались от 0,04 до 0,33 м/сек, в то время как число Рейнольдса для газового потока изменялось от 14 до 115 при ламинарном режиме течения. Получены зависимости скорости испарения от времени при различных расходах газа (рис. 1.9), зависимость коэффициента массопередачи от высоты газового канала (рис. 1.10):

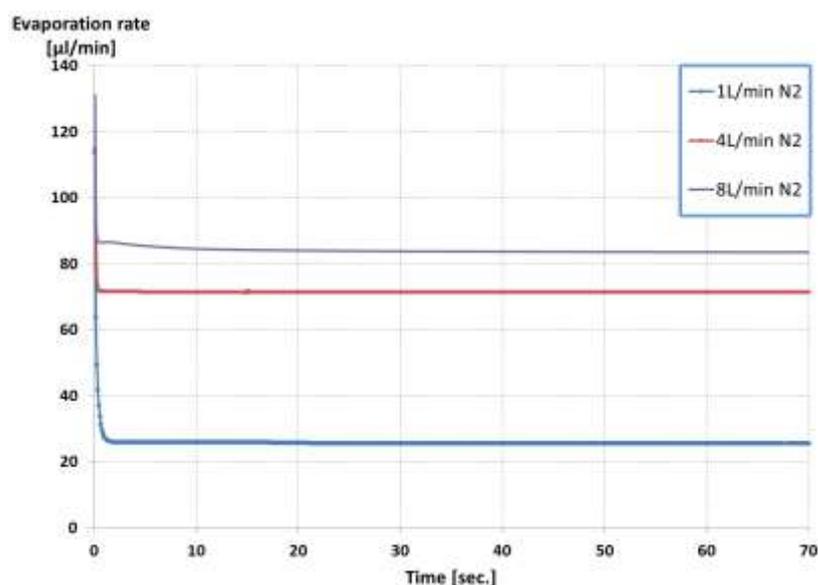


Рисунок 1.9 – Зависимость скорости испарения от времени при различных скоростях потока [13]

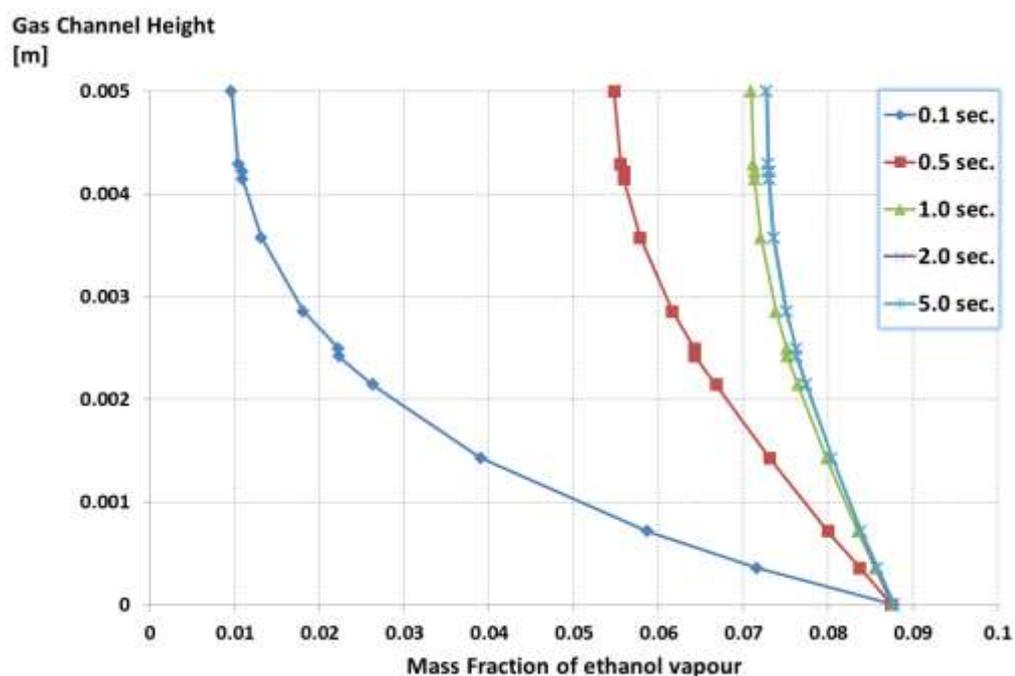


Рисунок 1.10 – Зависимость коэффициента массопередачи от высоты газового канала в разные моменты времени [13]

Установлено, что изменение скорости испарения происходит очень стремительно в течение нескольких секунд (рис. 1.9) при отсутствии паров в газовой фазе. В дальнейшем процесс испарения происходит за счет разности энтропий. Скорость испарения возрастает с увеличением объемного расхода газа, это увеличение имеет нелинейный характер. При четырехкратном увеличении скорости газового потока скорости испарения увеличивается в 2,5 раза. При стабилизации скорости испарения термические узоры на поверхности раздела жидкость-газ продолжают развиваться. Основной движущей силой влияющей на увеличение скорости испарения на поверхности раздела является пограничный паровой слой [14], который ограничивает процесс диффузии до момента, пока пар не удалится потоком газа.

Температурный скачок и скачок давления на границе раздела жидкость-газ, рассматривались в работе [15]. С помощью кинетической теории методами численного моделирования для двух поверхностей реализуются явления испарения и конденсации.

Представлена модель двухфазной системы, которая включает в себя жидкую и паровую фазы, а также условия для перепада температуры и давления, полученные из [16,17-21,22]. Рассчитывается одномерная задача тепло- и массообмена для системы жидкость-пар. Жидкость нагревается от нижней поверхности твердого тела и испаряется на поверхности раздела жидкость-пар, затем пар конденсируется в верхней более холодной области рис. 1.11:

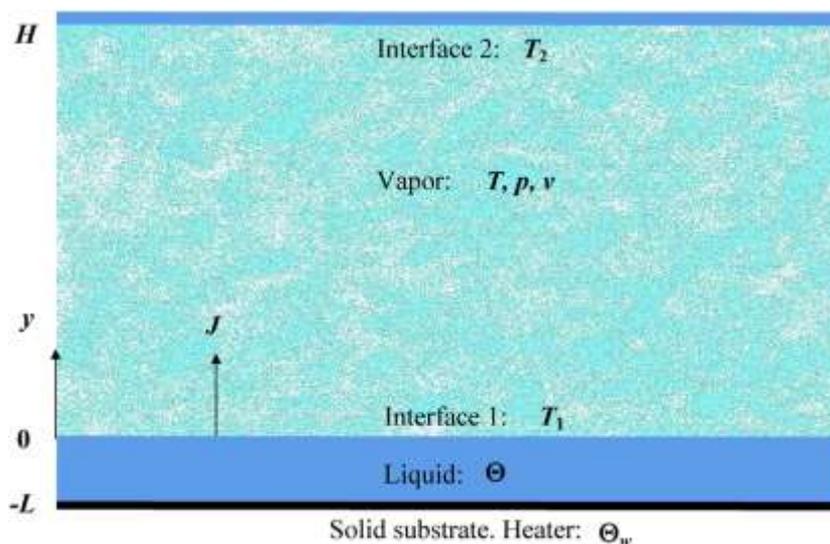


Рисунок 1.11 – Геометрическая постановка задачи [15]

Изначально, задача решается для паровой фазы. Представлены решения линейной аппроксимации уравнений Навье-Стокса (НС) и кинетических уравнений, а также их сравнение с решениями полных уравнений НС. Затем моделировалась двухфазная задача и проводился анализ теплового потока.

Настоящий анализ может применяться для моделирования микросистем, таких как системы охлаждения электроники. Руководствуясь кинетической теорией установлено, что температура и давление возрастают на поверхности в условиях жидкость-газ. В работе [15] в соответствии с предложенной моделью проектируется устройство, которое сочетает в себе принципы теплопроводности и фазовый переход.

Можно сделать вывод, что в условиях задачи тепло- и массопереноса в двухфазной системе с учетом испарения/конденсации, лучше рассматривать

двусторонние системы, которые включают в себя процессы для жидкой и газовой фаз. Двусторонний подход с перепадом давления и температуры может дать реальную оценку теплового потока, который будет отводиться от источника тепла.

1.2 Экспериментальные исследования процессов испарения под действием потока газа

В [23] выполнялось экспериментальное исследование теплопереноса от локального источника тепла к пленке жидкости, стекающей вниз по вертикальной пластине.

Эксперименты проводили при атмосферном давлении, измерения выполнялись в стационарных условиях. На рис. 1.12 изображен фотокадр и схема экспериментальной установки:

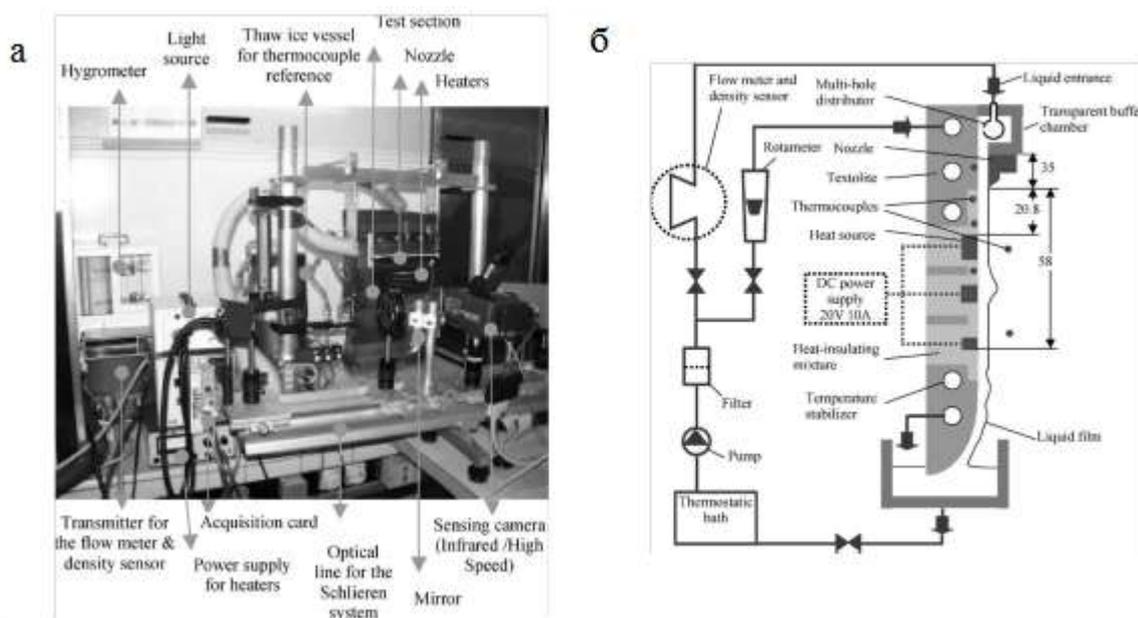


Рисунок 1.12 – Экспериментальная установка: а – фотокадр, б – схема [23]

В экспериментальных исследованиях влажность и температура окружающего воздуха поддерживались постоянными: $50 \pm 5\%$ и $20 \pm 0,5$ °С, соответственно. Жидкость закачивали из термостатической ванны, закрепленной в верхней части основной пластины (подложки). Основная пластина выполнена из текстолита размером $250 \times 334 \times 46$ мм³ (ширина, длина и толщина, соответственно). Постоянная температура сохраняется с помощью внутренней системы термостабилизации, выполненной в виде каналов диаметром 8 мм, через которые прокачивалась жидкость. Ширина стекающей пленки 191,6 мм. Использовались три нагревателя с размерами: $4,02 \times 68,1$ мм² (два нагревателя) и $2,22 \times 68,05$ мм² (один).

Высокоскоростная камера использовалась для измерения скорости путем отслеживания индикаторных частиц алюминия, средний размер которых 5 мкм. Экспериментально установлено, что критический тепловой поток уменьшается с увеличением длины нагревателя.

Также установлено, что при достаточно малых числах Рейнольдса происходит перераспределение тепловых потоков и температур внутри нагревательного элемента. Это перераспределение связано с изменением средневзвешенной температуры жидкости на поверхности нагревателя и зависимости локального коэффициента теплопередачи от продольной координаты. Термокапиллярно-противоточный индуцированный неравномерный нагрев вызывает деформацию поверхности пленки, имеющей рельефную форму. Эта форма становится неустойчивой выше критического значения теплового потока и деформируется в вертикальном направлении вниз по течению жидкости.

В работе [24] проводилось численное моделирование и экспериментальные исследования локально-нагреваемой движущейся пленки жидкости в микро- и мини-каналах под действием потока газа.

Рассматривался канал с прямоугольным поперечным сечением высотой H , которая намного меньше его ширины B . Геометрическая постановка задачи представлена на рис. 1.13:

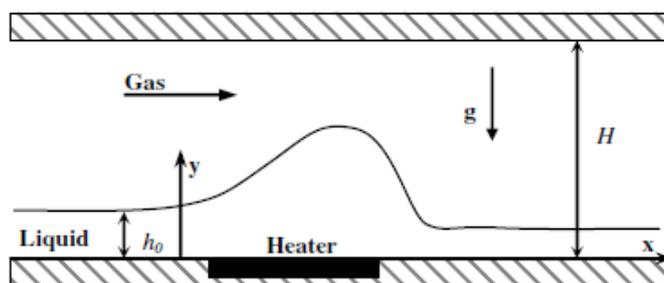


Рисунок 1.13 – Геометрическая постановка задачи [24]

Численное моделирование показало, что при отношении $Re_l/Re_g < 0,35$, движение жидкого слоя происходит под действием касательных напряжений, вызванных газовым потоком, протекающим по поверхности раздела

жидкость-газ. Построена карта режимов течения для ровной поверхности пленки и области 2D волн. На рис. 1.14 представлен фотокадр 2D (образование волнообразных структур на поверхности жидкости) и 3D (образование волнообразных структур по всей толщине слоя жидкости) волн:

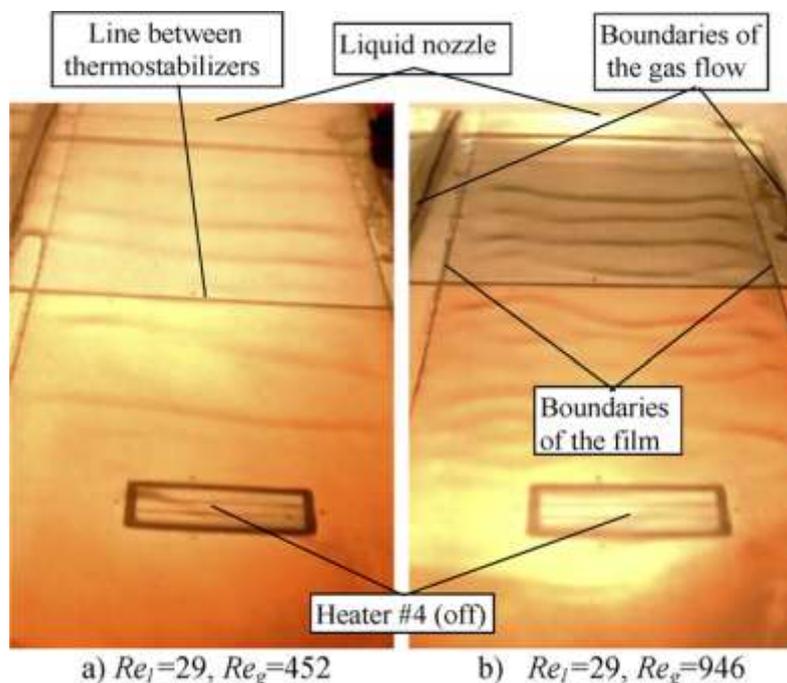


Рисунок 1.14 – Фотокадр 2D волн (a) и 3D волн (b) при $W_f=65$ мм, $h_N=200$ мкм [24]

В экспериментальных исследованиях мини-канал располагался горизонтально при атмосферном давлении и температуре жидкости $T_{OL}=20-22^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды принималась, как начальная температура газа $T_{0g} = 22-25^\circ\text{C}$. В качестве рабочей жидкости использовали воду, газ - воздух. Высота газового канала 2 мм. Эксперименты (в том числе с нагревом) выполнялись в канале с шириной $W_f = 65$ мм. Распределение температуры на поверхности пленки измерялось с помощью инфракрасного сканера, после сканирования установлено, что термокапиллярные напряжения преобладают над касательными, вызванными трением газа о поверхность жидкости, что указывает на значительный вклад эффекта Марангони на динамику испарения.

В статье [25] рассматривался локально-нагреваемый двухфазный поток в микро-канале.

На рис. 1.15 показана система охлаждения, в которой тепло, выделяемое на одиночном чипе, передается в пленку жидкости, увлекаемую спутным потоком газа:

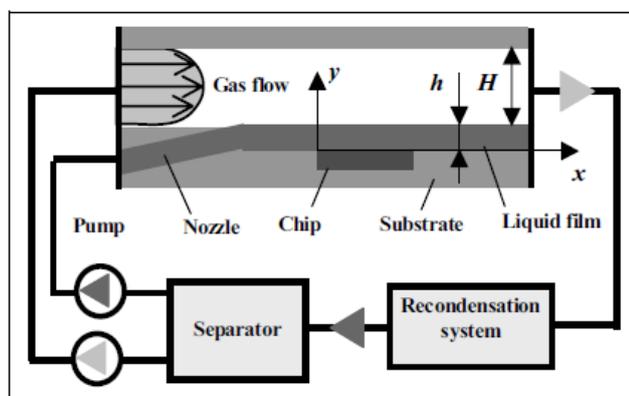


Рисунок 1.15 – Концепция системы охлаждения [26]

Эксперименты проведены на двух рабочих участках с использованием двух рабочих жидкостей: вода и FC-72. Исследование течения пленки воды, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале высотой 2 мм, описано в [26]. Эксперименты проведены в диапазоне чисел Рейнольдса для потока жидкости 0,5 - 12 и потока газа 0,3 – 30, соответственно ($T_{0l} = T_{0g} = 20-22$ °C).

Минимальное число Рейнольдса для потока жидкости в системе охлаждения может быть рассчитано с помощью выражения:

$$Re_{\min} = q_{CHF} L / \mu((T_{sat} - T_0)c_p + r), \text{ рис.1.16:}$$

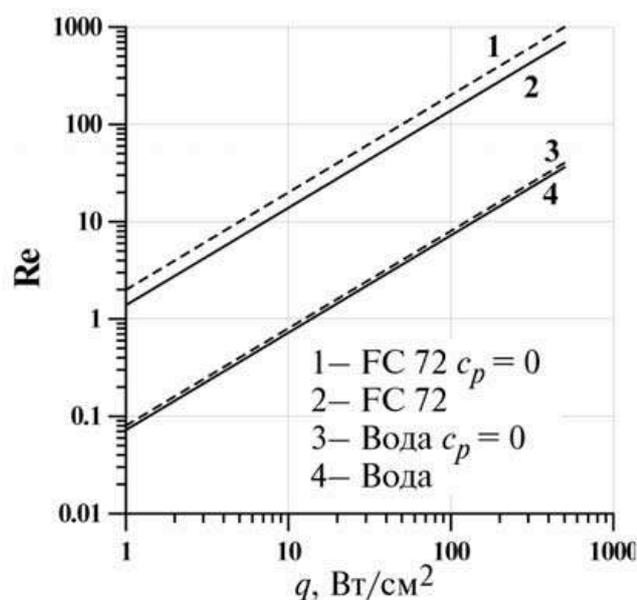


Рисунок 1.16 – Минимальное число Рейнольдса для потока жидкости [25]

Выявлена роль начального участка теплового пограничного слоя, формирующегося в пленке, и показано его отрицательное влияние на интенсификацию теплообмена посредством интенсивного испарения. При достаточно малых размерах нагревателя и относительно больших числах Рейнольдса жидкостного и газового потоков температура поверхности пленки практически не зависит от плотности теплового потока, что снижает интенсивность испарения. Одно из возможных технических решений данной проблемы - использование микроорезбрения. Расчеты показали, что для микроэлектронных компонентов размерами от 2 до 10 мм отвод теплового потока 100 Вт/см^2 при температуре стенки меньше 100°C с помощью пленки воды возможен даже при слабом испарении (15%). Следует заметить, что расчеты выполнены для недеформируемой пленки жидкости. Деформация поверхности, с одной стороны, может привести к дополнительной интенсификации теплообмена, с другой — к формированию сухих пятен.

В работе [27] экспериментально исследовалось всплытие одиночных воздушных снарядов в покоящейся жидкости в вертикальных и наклонных прямоугольных мини-каналах. Установлено, что скорость всплытия снарядов в таких каналах в основном определяется протеканием жидкости в углах канала и снаряды всплывают даже при малых числах Этвеша. Представлена

корреляционная зависимость для скорости всплывания одиночных снарядов в таких каналах. Также в работе [27] представлены результаты экспериментального исследования межфазного массообмена в системе углекислый газ – вода (с добавлением щелочи КОН в малой концентрации для улучшения смачивания). При зависании одиночных снарядов в прямоугольных каналах различных проходных сечений выявлено влияние температуры и химической реакции на массообмен в этой системе.

На рис. 1.17 показаны все полученные экспериментальные данные в виде зависимостей $Sh^*/Pe^{1/2}$ от l/d . Представлены данные для каналов с сечением 3,5x4,9; 3,9x3,8; 3,9x7,5; 4,5x13 и 9,6x9,7 мм и трубок диаметром 8,5 и 8,6 мм [28]. Все данные приведены к одной температуре $T=20^\circ\text{C}$, учтено влияние щелочи (для каналов прямоугольного и квадратного сечений). Как видно из этих графиков, зависимости коэффициентов массоотдачи для прямоугольных каналов и каналов квадратного сечения имеют различный вид:

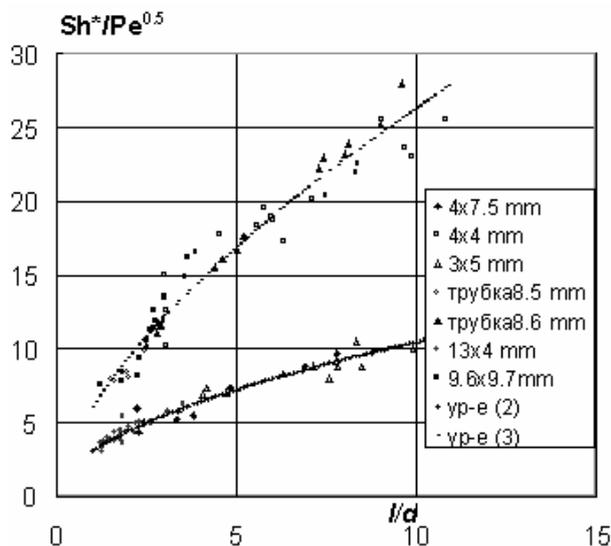


Рисунок 1.17 - Экспериментально полученные коэффициенты массоотдачи для всех каналов и трубок [27]

Получены степенные аппроксимации для безразмерного коэффициента массообмена в каналах прямоугольного сечения:

$$Sh^* = 3,06(l/d)^{0,55}$$

и в каналах круглого и квадратного сечений:

$$Sh^*=5,99(1/d)^{0,06}.$$

Для всех каналов в качестве значения d из двух характерных размеров берется d_{\max} .

В статье [29] представлены экспериментальные данные по течению и разрыву пленки жидкости, движущейся под действием потока газа в горизонтальном мини-канале (высотой 2 мм) с нагревателем, который имеет размеры 22×6,55 мм.

Схема экспериментального участка представлена на рис. 1.18:

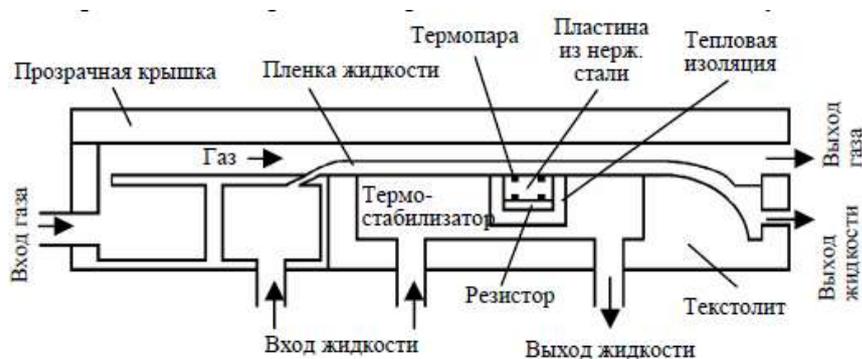


Рисунок 1.18 – Схема рабочего участка [29]

Для изотермического случая построена карта режимов течения (рис. 1.19). Обнаружено, что порядок разрыва пленки под действием нагрева существенно различается для различных режимов течения. Критический тепловой поток для разрыва пленки в некоторых режимах оказался в несколько раз больше, чем в случае пленки жидкости, движущейся под действием силы тяжести.

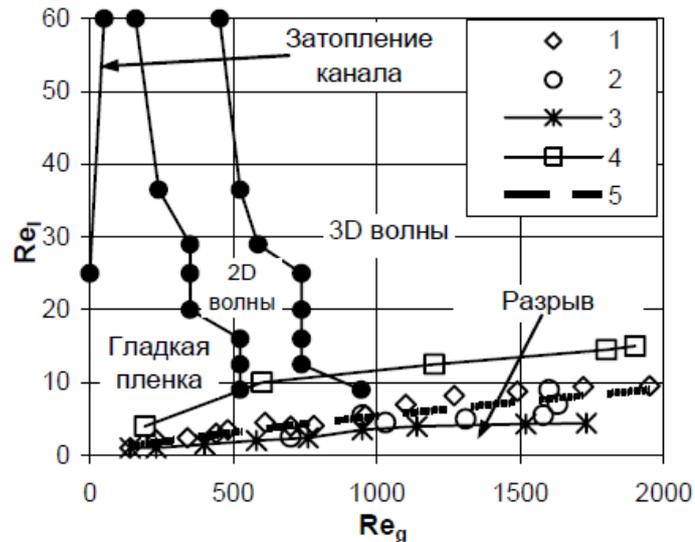


Рисунок 1.19 - Карта режимов течения для изотермического случая.

Разрыв: 1 — $W_f=65$ мм, $h_N=250$ мкм, 2 — $W_f=65$ мм, $h_N=250$ мкм, 3 — $W_f=65$ мм, $h_N=150$ мкм; 4 — $W_f=120$ мм, $h_N=200$ мкм; 5 — усреднение данных 1 и 2. Все остальные данные — $W_f=65$ мм, $h_N=200$ мкм [29]

На рис. 1.20 показана зависимость критического теплового потока q_{idp} , при котором возникает первое устойчивое сухое пятно, от числа Рейнольдса для потоков жидкости и газа. Видно, что q_{idp} возрастает с ростом как Re_l , так и Re_g . Штриховая линия отображает данные по разрыву локально-нагреваемой пленки жидкости,двигающей под действием гравитации, на нагревателе $13 \times 6,5$ мм (аналогичная длина нагревателя) [30]. При относительно небольших Re_l пленка, движущаяся под действием потока газа, разрушается при таких же или даже меньших тепловых потоках, чем «гравитационная» пленка. Однако, при больших значениях Re_l , q_{idp} для вынужденно-двигающейся пленки до 3 раз и более превосходит q_{idp} , соответствующие пленке, стекающей под действием гравитации.

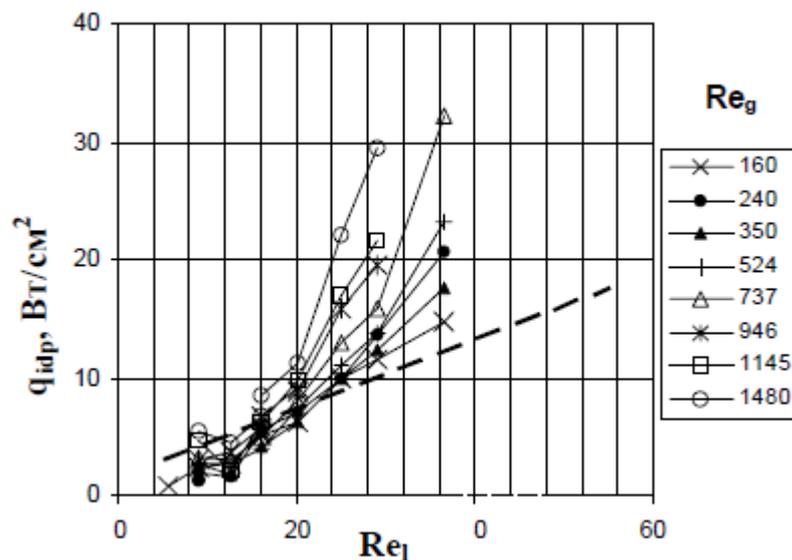


Рисунок 1.20 - Зависимости критического теплового потока от чисел Рейнольдса жидкостного и газового потоков. Штриховая линия — данные для гравитационной пленки [30]

Авторы работы [31] выполняли экспериментальные исследования по разрыву и кризису теплообмена в пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале, при нагреве от локального источника тепла размером 1x1 см.

На рис. 1.21 представлены фотографии течения и разрушения пленки жидкости в процессе увеличения теплового потока при $Re_g=1800$. При некотором пороговом тепловом потоке q_{idp} пленка разрывается и образуется первое сухое пятно. Первое сухое пятно зарождается чуть ниже нагревателя по потоку, вдоль боковой кромки нагревателя (рис. 1.22, a).

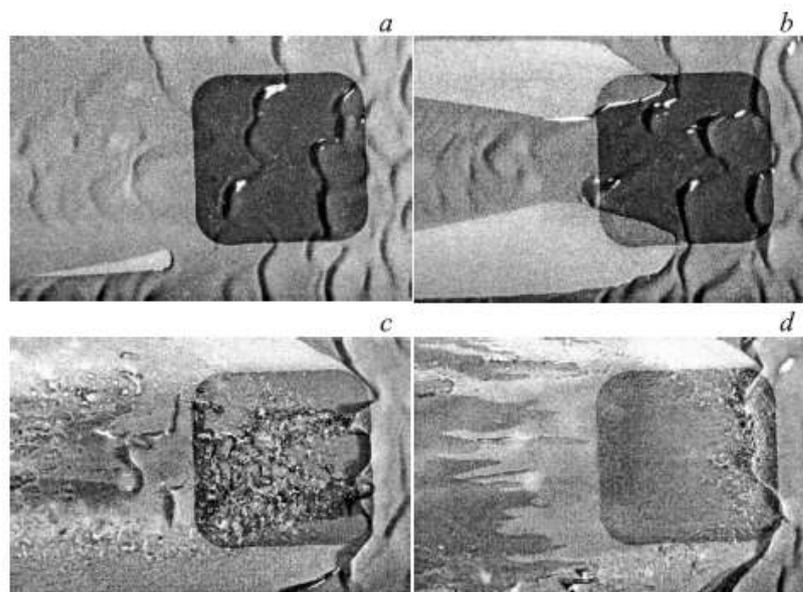


Рисунок 1.21 - Разрушение пленки жидкости в процессе увеличения теплового потока, при $Re_l=21$ и $Re_g=1800$. Течение направлено справа налево. а - $q=42 \text{ Вт/см}^2$, $T_w=63^\circ\text{C}$; б - $q=50 \text{ Вт/см}^2$, $T_w=67^\circ\text{C}$; в - $q=145 \text{ Вт/см}^2$, $T_w=119^\circ\text{C}$; г - $q=170 \text{ Вт/см}^2$, кризис [31]

Физический механизм разрыва пленки является термокапиллярным, так как сухое пятно образуется при достаточно низкой температуре подложки [32].

На рис. 1.22 показано влияние числа Рейнольдса газового потока на пороговое значение теплового потока (q_{idp}) для разрыва пленки и на критический тепловой поток (q_{cr}) в сравнении с пленкой жидкости, стекающей под действием гравитации. Установлено, что при относительно небольших расходах газа пленка, ориентированная горизонтально, менее устойчива к разрушению в сравнении с вертикальной. Тем не менее, при высоких числах Рейнольдса газового потока тепловой поток, необходимый для разрыва горизонтальной пленки, до 2 раз превышает значение, полученное для вертикальной, а критический тепловой поток до 10 раз и достигает 250 Вт/см^2 .

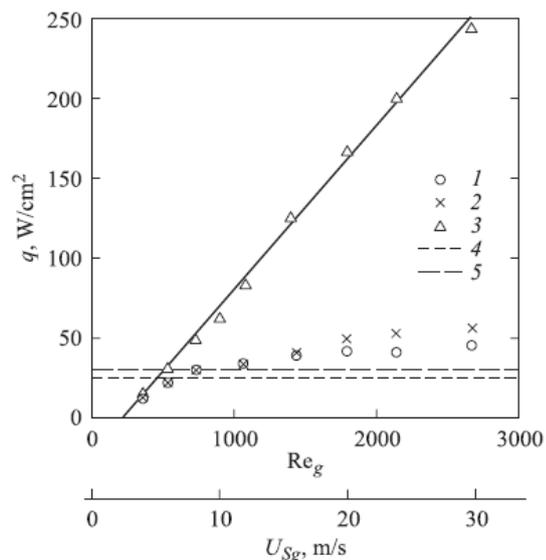


Рисунок 1.22 - Влияние расхода газа на разрыв пленки и кризис теплообмена [32]

Исследовались [33] режимы течения пленок жидкости с параллельным движением газа над ними в горизонтальных микро-каналах. Выделены четыре основных: пузырьковый, кольцевой, слоистый и пробковый, а также несколько субрежимов. Установлено, что пузырьковый режим характеризуется равномерным распределением мелких пузырьков в жидкой фазе. Пробковый - чередованием пробок жидкости, разделенных пузырьками газа. В кольцевом потоке слой жидкости течет вдоль стенок канала, а пар движется в центре, создавая паровое ядро, в котором могут присутствовать капли жидкости. При слоистом режиме жидкость движется в нижней части канала, а газ в верхней. Исследовался механизм движения пленки жидкости FC-72 под действием азота в мини-канале. Расход жидкости и газообразного азота варьировался от 0,5 до 40 мл/мин и 0,5 – 50 л/мин, соответственно. Для визуализации экспериментов использовалась шпирен-система. Установлено, что жидкость FC-72 под действием потока газа имеет волнообразную структуру в мини-канале в исследуемых диапазонах скоростей потока жидкости/газа.

Установлено [33], что для пленок, движущихся совместно с параллельным потоком газа в микро-каналах пары переносятся посредством

вынужденной конвекции и диффузии, причем последняя более значительно влияет на перенос паров в условиях малой скорости газа.

Авторы работы [34] проводили экспериментальные исследования различных типов неустойчивостей, возникающих при взаимодействии жидкостных и газовых потоков в коротких горизонтальных каналах длиной 80 мм и высотой от 100 до 500 мкм. Использовались флуоресцентный и шпирен-методы для определения характеристик течения. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением флуорофора Родамин 6G, а в качестве газа – азот. На рис. 1.23 представлена схема развития неустойчивости при движении потока в каналах высотой 0,42-0,49 мм и шириной 20-40 мм:

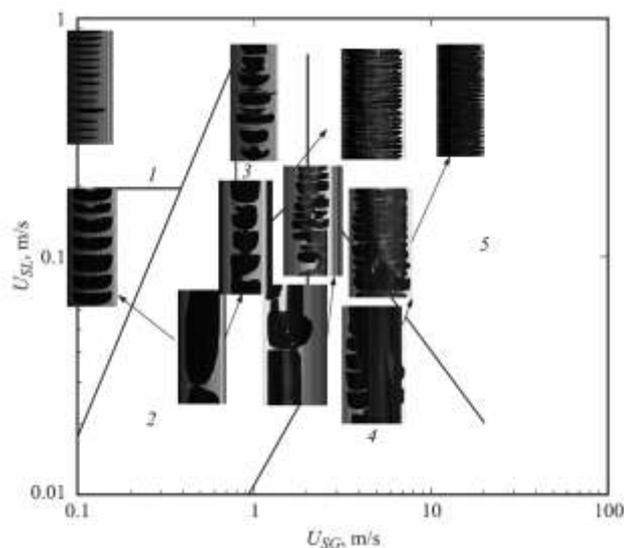


Рисунок 1.23 – Схема развития боковой неустойчивости при движении потоков жидкости и газа в каналах высотой 0,42-0,49 мм и шириной 20-40 мм. Режимы течения для канала 0,49 x 20 мм: 1 – пузырьковый, 2 – струйный, 3 – вспененный, 4 – раздельный, 5 – кольцевой [34]

В каналах высотой от 200 до 500 мкм жидкость под действием капиллярных сил смещалась в боковые части канала. Формирование пузырей происходило вблизи входа жидкости в канал только при достаточно высоких скоростях жидкости и малых значениях скорости газа. При малых скоростях жидкости газ двигался в центре канала, а основная часть жидкости двигалась

по периферии вдоль боковых стенок. С увеличением скорости газа увеличивалась его доля в канале. Стационарный струйный режим наблюдался при малых скоростях жидкости и газа. Переход к вспененному сопровождался появлением сплошных заполненных перемычек, которые были достаточно устойчивыми и их число превышало единицу. При переходе к кольцевому режиму течения сплошные заполненные перемычки исчезают. В области высоких скоростей происходит переход от раздельного к кольцевому течению.

Экспериментально исследовалось [35] испарение жидкости с попутным движением потока газа над ней в горизонтальном мини-канале. Скорость испарения жидкости HFE-7100 измерялась с помощью двух независимых способов (относительная погрешность измерений между двумя способами составляла не более 10% для 60% обработанных данных). Первый основан на измерении разницы массового расхода газа, измеряемого регулятором давления и расходомером, на входе и выходе из рабочего участка. Второй способ заключается в измерении расхода жидкости, подаваемой в рабочий участок для поддержания плоской межфазной границы.

Зависимость массовой скорости испарения жидкого слоя от средней скорости газа при различных температурах газа/жидкости представлена на рис. 1.24:

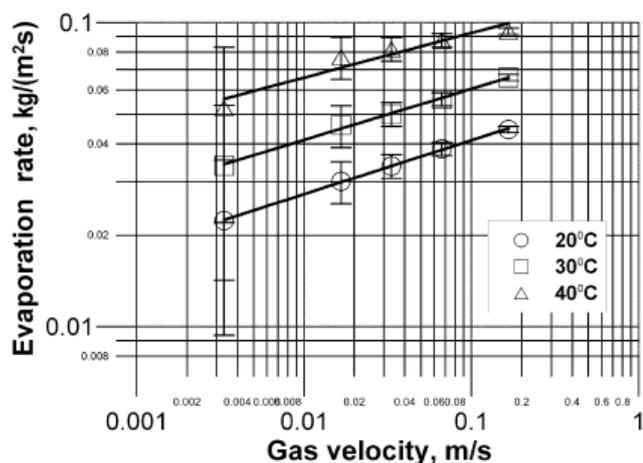


Рисунок 1.24 – Зависимость массовой скорости испарения жидкого слоя от средней скорости газа при различных температурах газа/жидкости при толщине слоя жидкости 3 мм [35]

Графические зависимости скорости испарения от температуры приведены на рис. 1.25 и 1.26:

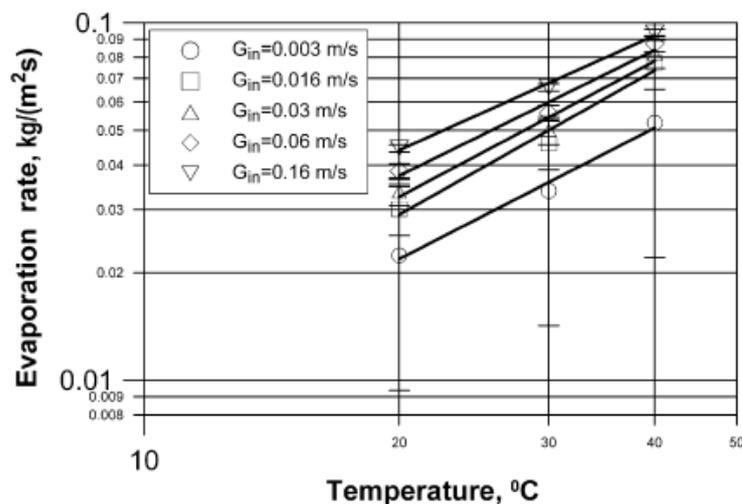


Рисунок 1.25 – Зависимость массовой скорости испарения от температуры при толщине слоя жидкости 3 мм [35]

Как видно на рис. 1.25 скорость испарения увеличивается нелинейно по отношению к росту температуры:

$$Q_l = CT^m$$

где Q_l – массовая скорость испарения [кг/м²·с]; Т – температура [° С]; С – постоянная величина; m – степень.

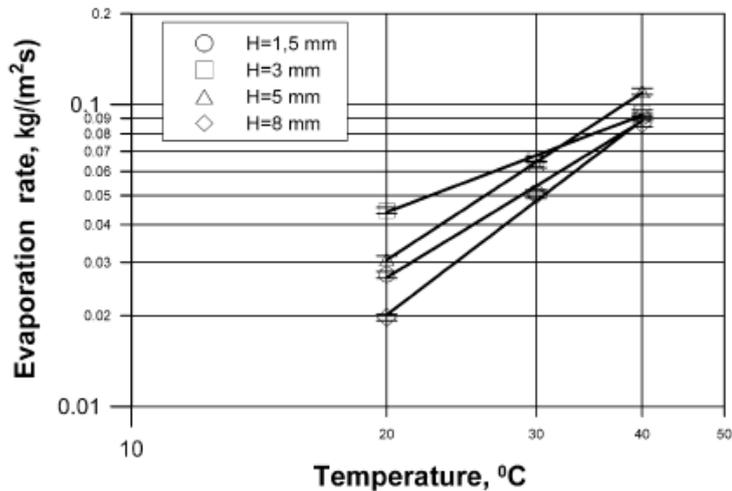


Рисунок 1.26 – зависимость массовой скорости испарения в зависимости от температуры газа/жидкости при различной толщине слоя жидкости (1,5; 3; 5; 8 мм) [35]

На рис. 1.26 изображена зависимость массовой скорости испарения от температуры газа/жидкости при различной толщине жидкости.

Зависимость выражается в виде:

$$G_{liq} = BT^l$$

где G_{liq} – массовая скорость испарения [кг/м²·с]; T – температура [° C]; B – постоянная величина; l – степень.

На рис. 1.25 и 1.26 можно наблюдать рост скорости испарения по отношению к росту температуры. Это объясняется тем, что средняя кинетическая энергия молекул жидкости увеличивается с увеличением температуры жидкости. Таким образом, увеличивается число молекул, обладающих достаточной кинетической энергией, чтобы покинуть поверхность жидкого слоя. Концентрация паров на свободной границе соответствует давлению насыщенного пара при температуре поверхности раздела и увеличивается с ростом температуры. Скорость испарения повышается за счет увеличения градиента концентрации паров в газовой фазе.

Так же в работе рассматривалась зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости рис. 1.27:

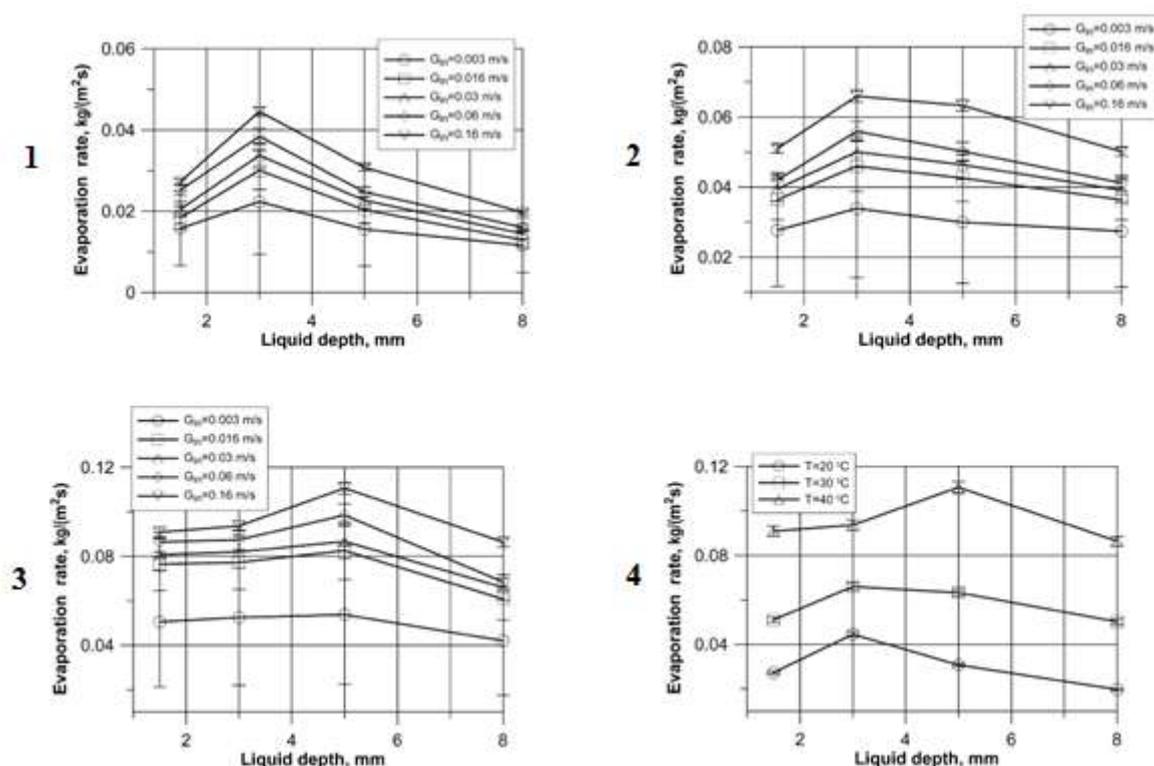


Рисунок 1.28 – Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости (1 – температура 20°C ; 2 – температура 30°C ; 3 – температура 40°C ; 4 – температуры 20; 30; 40°C) [35]

Установлено, что с увеличением толщины слоя жидкости массовая скорость испарения имеет локальный максимум (при толщине слоя жидкости 3 мм). Значение максимума скорости испарения зависит от скорости газа. Кроме того, значительное влияние на значение и положение максимума оказывает температура системы «жидкость-газ». Для температуры 20°C локальный максимум достигается при толщине 3 мм, для 30°C – 3 мм, 40°C – 5 мм. С увеличением температуры газа/жидкости от 20°C до 40°C локальный максимум смещается в сторону большего значения толщины слоя жидкости (от 3 мм до 5 мм).

Произведена визуализация и анализ структуры потока на поверхности раздела газ-жидкость. Максимальный расход испарения достигается при

стабильном и равномерном конвективном потоке слоя жидкости в направлении, противоположном направлению потока газа (рис. 1.28):

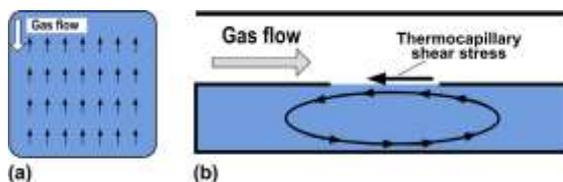


Рисунок 1.28 – Структура конвекции в слое жидкости [35]

Структура конвекции в слое жидкости изменялась в зависимости от параметров эксперимента, так как изменение каждого параметра вызывало нарушение баланса: касательные напряжения, вызванные потоком газа, испарение, термокапиллярный эффект и естественная конвекция.

Таким образом, структура конвекции в жидкости имеет довольно сложный вид (см также [36-38]) и зависит от баланса сил. После анализа зависимостей массовой скорости испарения от глубины слоя жидкости установлено, что внутри слоя жидкости возникают различные режимы конвекции в зависимости температуры газа/жидкости. Изменение глубины слоя жидкости оказывает влияние на распределение температуры в слое жидкости и естественную конвекцию, соответственно. Есть предположение, что существует определенная закономерность, которая описывает возникновение различных режимов конвекции внутри жидкого слоя, при которой достигается максимальное значение скорости испарения, и это определяется природой системы «жидкость-газ». Для более детального анализа этого явления, необходимо знать распределение частиц и температур в жидком слое, но на описанном этапе исследований использовалась только теневая-система.

В работе [39] экспериментально исследовалось влияние температуры и расхода газа, движущегося параллельно слою неподвижной жидкости, на скорость испарения при условии формирования устойчивой плоской межфазной поверхности раздела «жидкость-газ».

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке. В качестве неподвижного слоя жидкости толщиной 3 мм использовался этанол (95 mass%, ГОСТ Р 51723-2001). Поверхность испарения, обдуваемая потоком газа (воздуха), была постоянной (100 мм²). Проведены две серии опытов: в первой поддерживался постоянный расход газа 500 мкл/мин. Температура системы «жидкость–газ» изменялась от 20 до 40°С с шагом 5°С с погрешностью не более 0.1°С. Во второй серии экспериментов расход газа варьировался от 100 до 500 мкл/мин с шагом 100 мкл/мин. Температура жидкости и газа была постоянной 25°С.

На рис. 1.29 а представлена зависимость массовой скорости испарения от температуры при постоянной средней скорости газа для системы «этанол–воздух» (первая серия экспериментов — линия 1) и результаты [40] для системы «HFE-7100–азот» (линия 2).

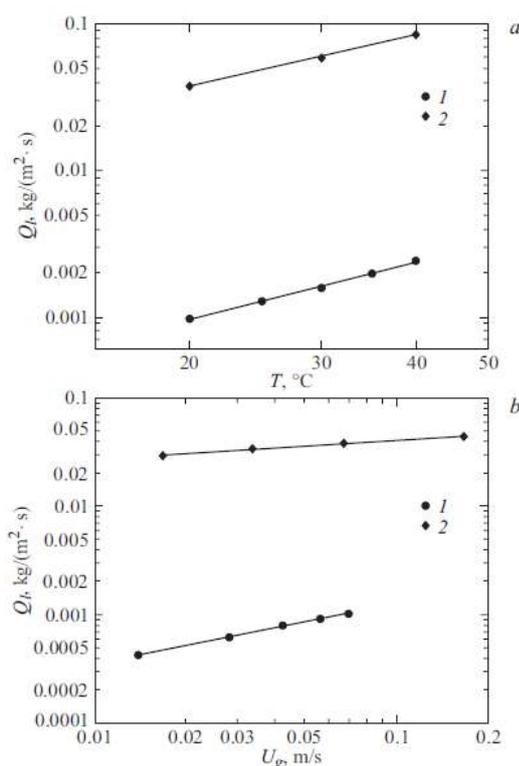


Рисунок 1.29 - Зависимость массовой скорости испарения от температуры при скорости газа 0,06 м/с (а) и от средней скорости потока газа при температуре жидкости и газа 25°С (б). 1 - «этанол – воздух»; 2 - «HFE-7100 – азот» [39]

Установлено, что при повышении температуры системы «жидкость–газ» возрастает массовая скорость испарения жидкости, наиболее вероятно, это вызвано увеличением кинетической энергии молекул при возрастании температуры. Зависимости $Q_l(T)$ массовой скорости испарения от температуры (рис. 1.29а) близки к линейным в логарифмических координатах и хорошо описываются степенными функциями:

система «этанол - воздух»:

$$Q_l = C_1 T^{1,22},$$

система «HFE-7100 – азот»:

$$Q_l = C_2 T^{1,17},$$

где Q_l – массовая скорость испарения $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; T – температура жидкости и газа, $^{\circ}\text{C}$; $C_1 = 2,0 \cdot 10^{-5}$ и $C_2 = 1,0 \cdot 10^{-3}$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$ для этанола и HFE-7100, соответственно.

Можно отметить, что различие в показателях степени составляют менее 5%, соответственно углы наклона линий 1 и 2 на рис. 1.29 также близки по значению. Зависимости массовой скорости испарения от температуры жидкости и газа для различных жидкостей имеют идентичный характер.

Представленные на рис. 1.29 б зависимости Q_l и U_g описываются следующими степенными аппроксимациями:

Система «этанол-воздух»:

$$Q_l = B_1 U_g^{0,54},$$

Система «HFE-7100 – азот»:

$$Q_l = B_2 U_g^{0,176},$$

где U_g – средняя скорость потока газа, $\text{м}/\text{с}$; $B_1 = 4,0 \cdot 10^{-3}$ и $B_2 = 6,0 \cdot 10^{-2}$ $\text{кг}/\text{м}^3$ для этанола и HFE-7100, соответственно.

Показатели степени отличаются более чем на 65%, что отражается в разных углах наклона линий на рис. 1.29 б. Свойства рабочей жидкости

существенно влияют на рост скорости испарения при увеличении средней скорости газа.

Скрытая теплота парообразования HFE-7100 в 8 раз меньше, чем у этанола. Вследствие этого зависимости для системы «HFE-7100 – азот» расположены выше, чем для системы «этанол-воздух». Кроме того, при атмосферном давлении температура кипения HFE-7100 (61°C) меньше, чем у этанола (78°C) на 17 °C. В одних и тех же условиях подвода теплоты со стороны подложки HFE-7100 испаряется заметно интенсивнее.

Автор статьи [41] рассматривал закономерности капиллярной гидродинамики и тепломассообмена при кипении, испарении и конденсации в каналах малого размера, а также их применение с целью повышения эффективности миниатюрных устройств (микроканальные системы термостабилизации, микроканальные парогенераторы и конденсаторы, и т.д.). Рассмотрены новые методики расчета теплообмена при кипении и испарении в микро- и мини-каналах. Теоретически установлены закономерности развития фазового взрыва и взрывного кипения микрообъемов жидкости в условиях высокого теплового потока.

В теплообменных аппаратах малого размера капиллярные силы стягивают жидкость в углы канала, толщина пленки стремится к нулю. Этим обусловлена сложность численного моделирования процесса испарения. В работе [41] рассматривалась модель «кольцевого» спутного газожидкостного течения в прямоугольном канале, которая основана на разделении течения в углу канала и пленочного течения на стенке. Течение потока жидкости в углу канала ограничено межфазным мениском, радиус которого R_m изменяется во времени.

На рис. 1.30 показан расчет поверхности жидкости при испарении и конденсации хладона R21 в мини-канале. Изменение плотности теплового потока по периметру канала площадью 6,3x1,6 мм при восходящем испарении R21, которое соответствует рис. 1.30, показано на рис. 1.31. Расчет показывает, что формирование сухих пятен в окрестности контактной линии

характерно для испарения в каналах малого размера. При конденсации, установление предельного радиуса кривизны мениска в углах вызывает выравнивание толщины пленки вне мениска, и снижает средний тепловой поток по сравнению с искривленной пленкой.

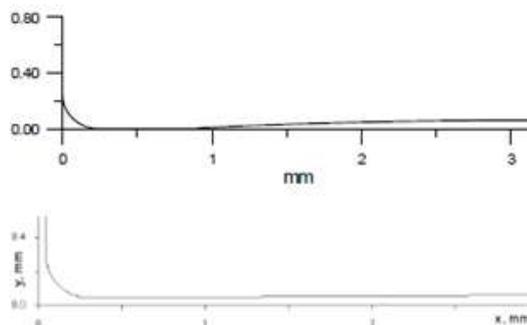


Рисунок 1.30 – Форма поверхности в канале 6,3 x 1,6 мм при массовой скорости 50 кг/м²с. Верхний рисунок - испарение; нижний – конденсация, X=0,6 [41]

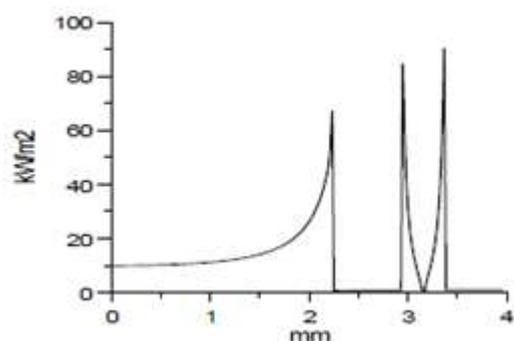


Рисунок 1.31 – Изменение плотности теплового потока по периметру канала 6,3x1,6 мм при восходящем испарении R21 [41]

1.3 Применение закона Герца-Кнудсена для расчета скорости испарения

В работе [42] проводилось математическое моделирование процесса теплопереноса в частично заполненной малогабаритной емкости при испарении сжиженного природного газа в условиях интенсивного локального нагрева. Задача сформулирована в двумерной постановке в цилиндрической системе координат, область решения задачи представлена на рис. 1.32:

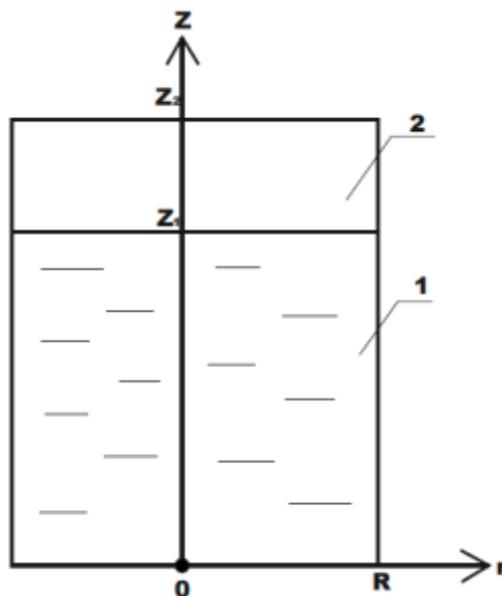


Рисунок 1.32 – Область решения задачи: 1 – сжиженный газ; 2 – газ в газообразном состоянии [42]

Массовая скорость испарения рассчитывалась с использованием математического выражения закона Герца-Кнудсена, широко используемого при решении задач тепломассопереноса в условиях интенсивного испарения жидкостей:

$$W = \frac{\beta}{1 - k \cdot \beta} \frac{(P^H - P)}{\sqrt{2\pi RT / M}};$$

где β – безразмерный коэффициент испарения; k – постоянная; P^H – давление насыщенных паров газа; P – давление паров газа вблизи границы испарения; M – молекулярная масса природного газа; R – газовая постоянная.

Автор статьи [43] экспериментальным путем изучал закономерности парообразования при температурах ниже кипения. Экспериментальные исследования проводились с помощью нагревательной камеры, в которой был помещен сосуд с определенным значением площади испарения. Масса сосуда измерялась с помощью лабораторных весов. В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Проводились исследования массовой скорости испарения в больших интервалах времени при различных температурах (рис. 1.33):

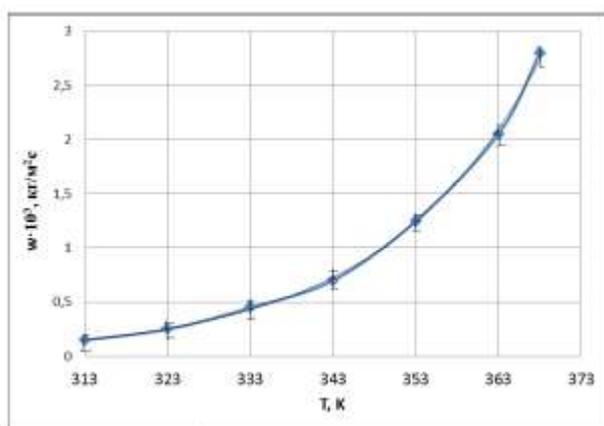


Рисунок 1.33 – Зависимость массовой скорости испарения от температуры [43]

Рассчитан коэффициент аккомодации, характеризующий число молекул пара, отрывающихся от поверхности испарения (табл. 1.1):

Таблица 1.1 – Коэффициент аккомодации дистиллированной воды [43]

Т, К	$W_{\text{исп}} \cdot 10^3, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	$P^H, \text{ Па}$	$P^*, \text{ Па}$	Коэффициент аккомодации, $A \cdot 10^3$
313	0,11	7375	6416	0,13
323	0,2	12330	10727	0,15
333	0,43	19920	17330	0,17
343	0,7	31160	27109,2	0,21
353	1,29	47360	41203,2	0,214
363	2,1	70110	60995,7	0,236

Полученные результаты могут послужить не только эмпирической базой для математического моделирования тепломассопереноса в условиях интенсивного испарения капель воды при движении через высокотемпературные газы.

Экспериментальные зависимости массовой скорости испарения исследовавшейся воды от температуры являются объективными предпосылками для определения коэффициента аккомодации в математическом выражении закона Герца-Кнудсена. Знание численного значения этой величины позволяет при проведении аналогичных экспериментов с водой, содержащей другие примеси, провести анализ влияния различных минеральных добавок на процессы фазовых превращений.

Целью работы [44] являлось исследование кинетики испарения составов системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-SiO}_2$, близких к САІ, в интервале температур 1600-2300 К. В работе применяется уравнение Герца-Кнудсена, которое гласит, что общее давление пара над соединением пропорционально скорости его испарения. В настоящей работе предлагается подход для расчета изменения состава конденсированной фазы при испарении, базирующийся на экспериментальных термодинамических данных.

Авторы работы [45] численно оценивали значения констант испарения жидкости при движении ее капель в потоке высокотемпературных газов.

Определялись константы испарения капель воды с помощью уравнения Герца-Кнудсена. Выполненные эксперименты и теоретический анализ результатов позволили определить значения основного параметра процесса испарения капель жидкости в высокотемпературной газовой среде – коэффициента испарения (конденсации). Полученные знания можно использовать при численном моделировании этих процессов для разных приложений газо- и парочапельных технологий.

В работе [46] обсуждались теоретические аспекты исследования задач с границами раздела, гипотезы, принимаемые при выводе условий на границе раздела, способы получения упрощенных установок.

Выводы по первой главе

По результатам проведенного анализа публикаций составлена таблица 1.2. В последней кратко представлена информация по работам, рассмотренным в первой главе.

Таблица 1.2 – Краткая информация по публикациям по тематике испарения тонких слоев жидкости под действием потока газа в мини- и микро-каналах

Источник	Направление исследований	Примечание
Моделирование		
4	Моделирование установившегося ламинарного течения пленки жидкости и спутного потока газа в канале.	Получено распределение температуры для линейного профиля скорости, рассмотрена задача термокапиллярной деформации поверхности пленки.
5	Моделирование процесса испарения в локально-нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием газового потока.	Исследовалось влияние испарения на теплообмен.
6	Разработка упрощенной аналитической модели теплопередачи для ламинарного режима течения пленки жидкости, стекающей по обогреваемой твердой поверхности.	Получено распределение температуры жидкости на поверхности нагрева при различных значениях чисел Рейнольдса газового потока.
7	Моделирование потока жидкости, обдуваемого потоком газа в мини-канале с нагревателем, расположенным в нижней стенке.	Получено распределение температуры на поверхности пленки FC-72 при различных значениях чисел Рейнольдса для потока жидкости и толщины слоя.
8	Моделирование двухфазной системы жидкость-газ.	Рассматривалась диффузия в газовой фазе и испарение с поверхности жидкости.
10	Моделирование конвекции в горизонтальном слое жидкости под действием потока газа.	Исследовалось влияние температуры, скорости газа.
11	Моделирование движения испаряющейся тонкой	Исследовано влияние скорости газа на

	пленки жидкости в микро-канале под действием потока газа.	концентрацию паров, распределение температуры в газовой и жидкой фазах, деформация поверхности раздела.
13	Моделирование процессов испарения в жидкости при обдувании ее потоком инертного газа.	Установлена связь между испарением и термокапиллярной конвекцией.
15	Моделирование температурного скачка и скачка давления в системе жидкость-газ.	Рассмотрены процессы испарения и конденсации в двухфазных системах.
Экспериментальные исследования		
23	Экспериментальное исследование теплопереноса в вертикальной пленке жидкости.	Установлено влияние критического теплового потока и режимов течения на теплообмен в пленке.
24	Численное моделирование и экспериментальные исследования локально-нагреваемой пленки жидкости в мини-канале под действием потока газа.	Установлено, что движение жидкости происходит под действием касательных напряжений, вызванных газовым потоком. Получено распределение температуры на поверхности пленки жидкости.
25	Экспериментальные исследования двухфазных потоков в микро-канале.	Выявлено влияние режимов течения на тепловой поток.
27	Всплытие одиночных воздушных снарядов в покоящейся жидкости в вертикальных и наклонных прямоугольных мини-каналах.	Получены условия всплытия, степенные аппроксимации для безразмерного коэффициента массообмена.
29	Течение и разрыв пленки жидкости, движущейся под действием потока газа.	Построена карта режимов течения, получены зависимости критического теплового потока от чисел Рейнольдса потоков жидкости и газа.
31	Исследование разрыва и кризиса теплообмена в пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в горизонтальном канале, при нагреве от локального источника тепла.	Рассматривалось разрушение пленки в зависимости от величины теплового потока.
33	Режимы течения жидких пленок с параллельным	Выделены основные режимы течения и причины

	движением газа над ними в горизонтальных микро-каналах.	перехода между ними.
34	Исследование различных типов неустойчивостей, возникающих при взаимодействии жидкостных и газовых потоков в каналах малого размера.	Построены схемы развития неустойчивостей.
35	Испарение жидкости с попутным движением потока газа над ней в горизонтальном мини-канале.	Исследовалось влияние расхода газа, обдувающего поток жидкости, температуры системы «жидкость-газ» и толщины слоя на скорость испарения.
25	Испарение жидкости с попутным движением потока газа над ней в горизонтальном мини-канале.	Исследовалось влияние температуры и расхода газа на скорость испарения жидкости.
41	Рассматривались закономерности капиллярной гидродинамики и теплообмена при кипении, испарении и конденсации.	Фазовые переходы хладагента R21.
Применение закона Герца-Кнудсена для расчета коэффициента аккомодации		
42	Математическое моделирование процессов испарения СПГ.	Применение закона Герца-Кнудсена для расчета массовой скорости испарения СПГ.
43	Получены значения коэффициента аккомодации жидкости при испарении.	Значения коэффициентов аккомодации определялись с помощью уравнения Герца-Кнудсена.
44	Исследование кинетики испарения системы CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -FeO-SiO ₂ .	Предлагается подход для расчета изменения состава конденсированной фазы при испарении, базирующийся на экспериментальных термодинамических данных.
45	Численно оценивали константы испарения.	Применение закона Герца-Кнудсена для расчета скорости испарения капель воды.
46	Обсуждение теоретических аспектов исследования задач с границами раздела.	Использование закона Герца-Кнудсена при моделировании процессов испарения.

По результатам анализа научных публикаций, направленных на изучение процессов испарения жидкости под действием газового потока в мини- и микро-каналах выявлено, что данной теме всегда уделялось большое внимание, но экспериментальных работ недостаточно. Большинство работ посвящены исследованию возникновения различного рода неустойчивостей на межфазной поверхности или исследованию гидродинамики без учета испарения.

Интенсивное испарение с поверхности тонкого слоя жидкости под действием потока газа вызывает различные конвективные течения в этом слое. Форма и структура этих течений является сложной и может оказывать существенное влияние на интенсивность испарения, от которой будет зависеть эффективность теплообменного оборудования, в котором применяются двухфазные системы.

Основными механизмами переноса в экспериментальных исследованиях являются вынужденная конвекция, естественная конвекция, термокапиллярная конвекция, диффузия (рис. 1.34):

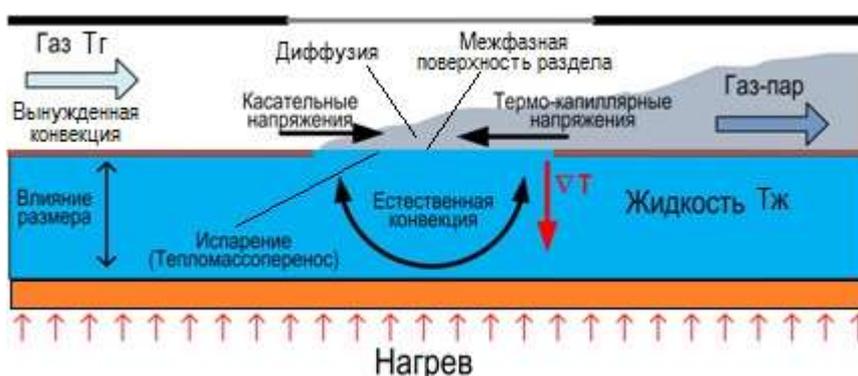


Рисунок 1.34 - Концепция экспериментальных исследований

В процессе испарения с поверхности горизонтального тонкого слоя жидкости под действием потока газа происходит интенсивный тепло- и массообмен на поверхности раздела «жидкость-газ». Жидкость охлаждается, в результате чего возникает градиент температуры в слое. Это приводит к возникновению термогравитационной конвекции, которая зависит от

разницы температур на поверхности и нижним слоем жидкости, а также от геометрических размеров канала. Под действием потока газа образуются касательные напряжения на поверхности раздела, что приводит к движению жидкости вдоль направления потока газа. В результате интенсивного испарения в начале зоны контакта газа и жидкости возникает градиент температуры вдоль поверхности раздела системы «газ-жидкость». Этот градиент температуры приводит в движение жидкость на поверхности в направлении обратном направлению потока газа. Обратное движение происходит за счет термокапиллярного эффекта или эффекта Марангони.

Для понимания общей картины исследований механизмов и факторов, влияющих на процесс испарения жидкости под действием потока газа, составлена таблица 1.3, в которой кратко приведена информация по публикациям:

Таблица 1.3 - Публикации по теме механизмы переноса и факторы, влияющие на процесс испарения жидкости под действием потока газа

Источник	Механизм переноса	Фактор, влияющий на механизм переноса
4	Термокапиллярная конвекция	1) Коэффициент теплоотдачи
4		2) Касательные напряжения
13		3) Скорость движения жидкости
23,24,25,31		4) Тепловой поток
35		5) Размер канала
35		6) Толщина слоя жидкости
5,11,	Диффузия	1) Толщина пленки жидкости
11,29,33		2) Скорость движения газа
7,15,35		3) Температура
8,13		4) Концентрация паров испаряющейся жидкости в газе
15		5) Давление
27,34,35		6) Размер канала
5,6,10,23,24,25,27,29,31,33,34,35	Конвекция	1) Скорость движения жидкости/газа
6,7,10,11		2) Температура жидкости/газа
27,34,35		3) Геометрия канала

Термокапиллярная конвекция

В работе [4] установлено, что тепловой поток в области нагревателя вызывает термокапиллярное касательное напряжение, под действием которого происходит уменьшение толщины пленки, что может привести к ее разрыву. В работе [13] установлено, что термогидродинамическое поле жидкости нарушается при обдувании ее потоком газа. Это является результатом возникновения парового пограничного слоя на поверхности жидкости. В статье [23] зафиксирована деформация пленки жидкости в результате термокапиллярного противоточного индуцированного неравномерного нагрева. Поверхность принимает рельефную форму, которая является неустойчивой для значений теплового потока выше критических. В [24] установлено, что в экспериментальных условиях термокапиллярные напряжения преобладают над касательными, вызванными потоком газа, что приводит к возникновению различных структур, деформаций на поверхности и дальнейшему разрыву. В [31] авторы полагают, что физический механизм разрыва пленки является термокапиллярным. Главные противоборствующие силы на поверхности - касательные и термокапиллярные напряжения. Выявлены зависимости числа Рейнольдса от критического теплового потока, при которых возникает разрыв пленки. В [35] выполнена визуализация структуры конвекции в слое жидкости, которая зависит от таких параметров как температура газа/жидкости, скорость газа, толщина слоя жидкости.

Диффузия

Установлено [11], что пар на поверхности раздела «жидкость-газ» перемещается за счет диффузии, которая преобладает при низких значениях чисел Рейнольдса для газового потока. С увеличением Re_g уменьшается концентрация паров в газовой фазе, так как происходит унос паров с помощью газа. В [13] авторы наблюдали резкое увеличение скорости испарения при отсутствии паров в газовой фазе. Пограничный паровой слой

сдерживает возрастание скорости испарения до момента, пока пар не удалится с помощью потока газа. В [33] установлено, что диффузия преобладает над вынужденной конвекцией в условиях малых скоростей газа. В [35] установлено, что с увеличением температуры системы «жидкость-газ» возрастает массовая скорость испарения. Это обусловлено увеличением градиента концентрации паров в газовой фазе.

Конвекция

В работе [7] авторами получено распределение температуры по поверхности пленки жидкости в зависимости от числа Рейнольдса. С повышением числа Рейнольдса положение максимума температуры смещается вниз. Конвективный механизм передачи тепла выражается более явно при высоких значениях Re . В [8] определялась степень влияния на конвекцию таких параметров как скорость газа, температура, в различных условиях гравитации. Движение свободной поверхности может происходить в направлении противоположном движению потока газа. В [29] установлено, что горизонтальные пленки, двигающиеся под действием газового потока менее подвержены разрывам, чем пленки, двигающиеся под действием силы тяжести. В [33] выделено три основных режима течения пленки жидкости: пузырьковый, кольцевой, пробковый. Произведена визуализация структуры потока для различных режимов. Установлено, что движущим механизмом при переносе паров является вынужденная конвекция. В [35] выявлено, что с увеличением скорости газового потока, возрастает массовая скорость испарения с поверхности слоя жидкости.

После анализа публикаций на тему: «Применение закона Герца-Кнудсена для расчета скорости испарения» можно сделать вывод, что данный закон находит свое применение, как в экспериментальных исследованиях, так и в теоретических. С его помощью можно определить скорость испарения, либо не менее важную характеристику процессов испарения/конденсации – коэффициент аккомодации. В рассмотренных

работах [42-46] представлены примеры применения данного закона в различных областях науки.

Испарение оказывает существенное влияние на развитие конвекции и тепло- массоперенос в слое жидкости. Детальных экспериментальных работ, посвященных исследованию взаимодействия конвекции и испарения, а также их взаимовлияния на теплообмен в зависимости от различных режимных параметров недостаточно.

Экспериментальные и теоретические данные по исследованию скорости испарения с поверхности слоя жидкости в газовую фазу встречаются довольно редко. Таким образом, полученные результаты, в первую очередь, помогут проверить адекватность существующих теоретических и численных моделей и более подробно изучить физику процесса. Поэтому необходимо проведение систематических экспериментальных исследований для достижения нового уровня понимания по взаимовлиянию структуры конвективных течений и динамики испарения на интенсификацию теплообмена в горизонтальном тонком слое жидкости, под действием потока инертного газа.

Скорость испарения (в условиях движения двухфазных потоков в мини-каналах) зависит от скорости газа, температуры газа и жидкости, толщины слоя жидкости и других параметров. Зависимости массовой или объемной скорости испарения слоя жидкости при движении двухфазной среды в мини-каналах получены для конкретных геометрических конструкций при определенных условиях испарения с различными теплоносителями. Отсутствуют обобщающие зависимости, позволяющие установить скорость испарения с учетом выше перечисленных факторов.

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

2.1 Планирование экспериментальных исследований

2.1.1 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента

Основным размерным термодинамическим параметром, влияющим на результаты экспериментов является температура рабочей жидкости, регулируемая с помощью изменения количества тепла, подводимого к подложке, и температура газа, регулируемая с помощью воды, которая прокачивается по специальным каналам и может нагреваться или охлаждаться с помощью термостата. Также важным входным параметром является расход газа на входе в рабочий участок, который контролируется с помощью регулятора расхода. Толщина слоя жидкости зависит от высоты пластины, установленной в рабочем участке.

Выходным параметром является расход парогазовой смеси на выходе из рабочего участка, массовая скорость испарения.

2.1.2 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

Известно [47], что исследования подразделяются на активные и пассивные. В данной работе проводились активные экспериментальные исследования.

Планирование эксперимента подразделяется на последовательное и рандомизированное [48].

Последовательное планирование заключалось в следующем: на каждом шаге экспериментатор принимал решение о завершении наблюдений (по истечении заданного времени, в течении которого снимались показания

расходов газа на входе и выходе, а также значения температур газа и жидкости).

При использовании последовательного плана изменение факторов происходит непрерывно в возрастающей или убывающей последовательности. В процессе исследования устанавливалась необходимая температура газа и жидкости и последовательно увеличивали расход газа на входе в рабочий участок от 100 мл/мин до 1000 мл/мин, когда экспериментатор заканчивал снимать показания при расходе 1000 мл/мин, увеличивались температуры газа и жидкости до заданного значения и эксперимент повторялся.

Рандомизированное планирование означает случайный выбор значения независимой переменной по какому-то неопределенному правилу.

2.1.3 Выбор области изменения основных факторов

В качестве функции цели экспериментов выбраны характеристики испарения слоя жидкости – измерение расхода парогазовой смеси на выходе из рабочего участка.

Изменение теплового потока, контролируемого источником питания, ограничивается максимальным значением силы тока (15 А), который можно пропускать через пьезоэлемент, чтобы он не вышел из строя.

Варьирование толщины слоя жидкости ограничено с одной стороны толщиной слоя жидкости, при котором сохраняется плоская межфазная граница, а с другой стороны – максимальной высотой пластины, установленной в рабочем участке (1, 2, 3, 4, 5 мм).

В таблицу 2.1. сведены данные по основным факторам воздействия:

Таблица 2.1 – Основные факторы воздействия

Расход газа на входе в рабочий участок	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 мл/мин.
Температура жидкости	15, 20, 25, 30, 35°C.
Температура газа	25°C.
Площадь межфазной границы	100мм ² .
Толщина слоя жидкости	1, 2, 3, 4, 5, 8 мм.
Скорость движения пленки жидкости	0 м/с.
Давление в контуре	Атмосферное.
Жидкость, используемая в системе	этанол (95% (масс.), ГОСТ Р 51723-2001
Газ, используемый в системе	Воздух.

Выходным параметром является расход парогазовой смеси на выходе из рабочего участка, массовая скорость испарения.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке и неподвижном слое жидкости. Поверхность испарения, обдуваемая потоком газа, оставалась неизменной и составляла 100 мм². Толщина слоя жидкости изменялась от 1 до 5 мм с шагом 1 мм. В качестве рабочей жидкости использовался этанол (95% (масс.), ГОСТ Р 51723-2001). Расход газа варьировался от 100 до 1000 мл/мин с шагом 100 мл/мин. Эксперимент повторялся при температуре газа равной 25°C и температуре жидкости от 15 до 35°C, погрешность измерения термомпарами составляла не более 0,1°C.

2.1.4 Точность измерения основных параметров

Инструментальная погрешность оборудования, используемого при проведении исследований массовой скорости испарения неподвижного слоя жидкости под действием потока газа представлена в табл. 2.2:

Таблица 2.2 – Инструментальная погрешность оборудования

Термисторы Micro-BetaCHIP MCD-10K3MCD1	0,2°C
Система сбора данных и коммутации (Agilent Technologies)	0,004%
Регулятор расхода Bronkhorst серии EI-Flow	0,5% от показаний
Расходомер Bronkhorst серии EI-Flow	0,5% от показаний

2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проведены на установке [39] по изучению динамики испарения и конвективных течений в мини-каналах.

Концепция эксперимента представлена на рис. 2.1. Включает использование апробированных ранее [35] методов изучения тепломассопереноса через межфазную границу раздела жидкости и газа.

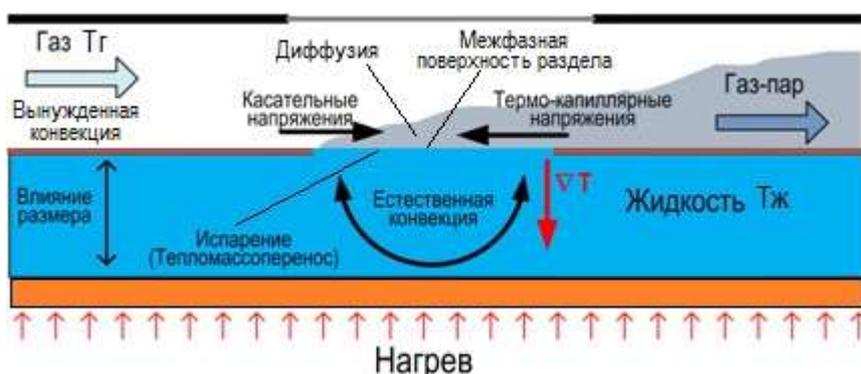


Рисунок 2.1 – Концепция эксперимента

2.2.1 Принцип действия экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.2, основными элементами которой являются:

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

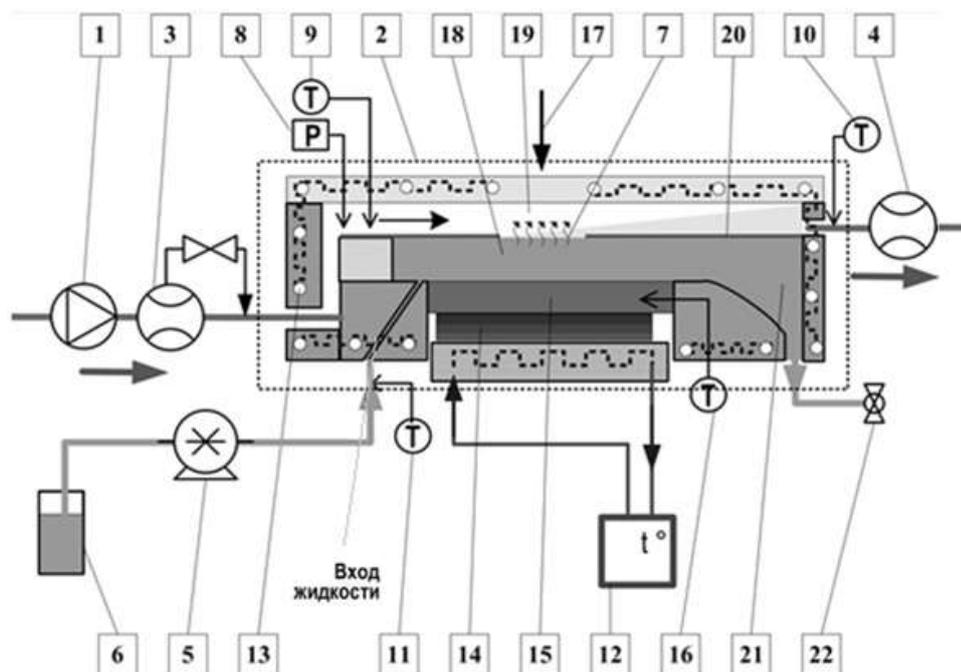


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки.

1 – вентилятор; 2 – рабочий участок; 3 – регулятор расхода; 4 – расходомер; 5 – перистальтический насос; 6 – контейнер; 7 – зона испарения; 8 – датчик давления; 9, 10, 11, 16 – соответственно термисторы на входе и выходе из рабочего участка; 12 – термостат; 13 – каналы в рабочем участке; 14 – термоэлектрический модуль Пелтье; 15 – медная пластина; 17 – теневой метод; 18 – жидкостная камера; 19 – газовый канал; 20 – пластина из нержавеющей стали; 21 – зона слива; 22 – вентиль

Фотокадр экспериментальной установки представлен на рис.2.3:

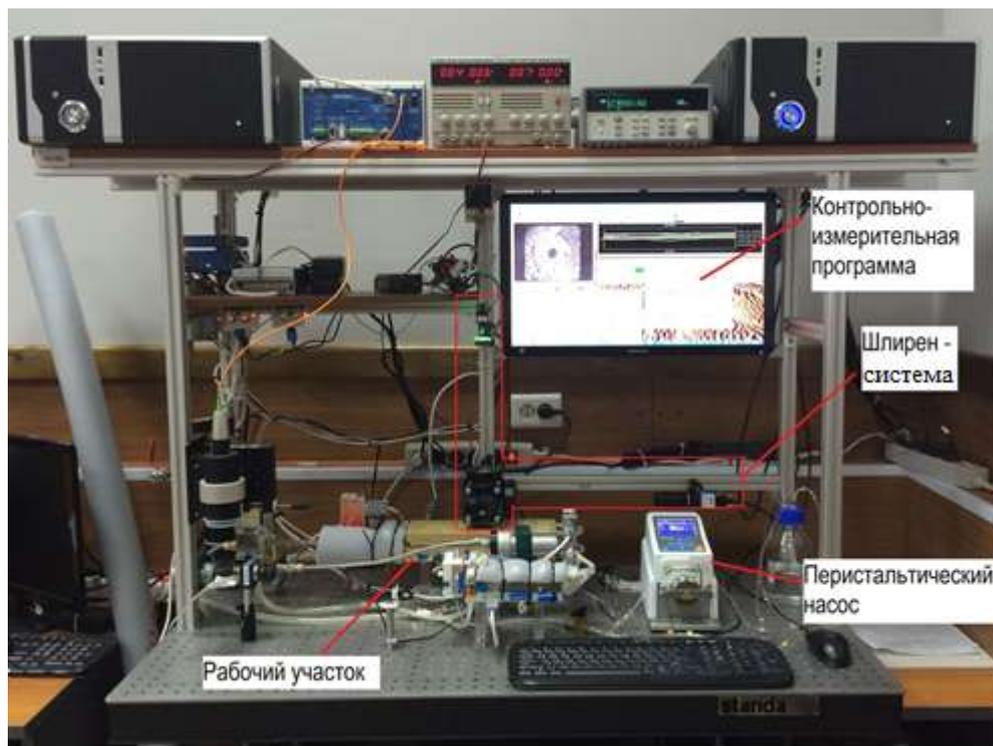


Рисунок 2.3 – Фотокадр экспериментальной установки

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

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

Воздух из атмосферы с помощью вентилятора 1 поступает в рабочий участок 2. Расход газового потока на входе рабочего участка контролируется регулятором расхода 3, на выходе измеряется расходомером 4. Насос 5 подает жидкость в рабочий участок из контейнера 6 и предназначен для поддержания постоянного уровня испаряющегося слоя жидкости в зоне испарения 7. Давление газа измеряется датчиком 8, температура газа и жидкости термисторами 9, 10 и 11. Температура газа термостабилизируется дистиллированной водой с заданной температурой, которая прокачивается термостатом 12 через каналы 13. Термоэлектрический модуль 14,

нагревающий медную пластину 15, обеспечивает необходимую температуру жидкости. Температура медной пластины измеряется термистором 16. Контроль положения межфазной границы раздела проводился теневым методом 17. Рабочий участок состоит из жидкостной камеры 18 (шириной 40 мм и изменяемой высотой от 1 до 10 мм) и газового канала 19 прямоугольного поперечного сечения (высотой 3 мм, шириной 40 мм, длиной 150 мм). Верхняя стенка жидкостного канала – пластина 20 из нержавеющей стали толщиной 200 мкм с квадратным вырезом, в котором происходит контакт жидкости и газа и формируется локальная область испарения 7. Пластина может устанавливаться с различными размерами выреза. Жидкость подается в жидкостной канал, проходя через камеру 18, испаряется и попадает в зону слива 21. Для проведения экспериментов с подвижным слоем вентиль 22 открывается.

2.2.2 Рабочий участок

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

Фотокадр рабочего участка представлен на рис. 2.4:

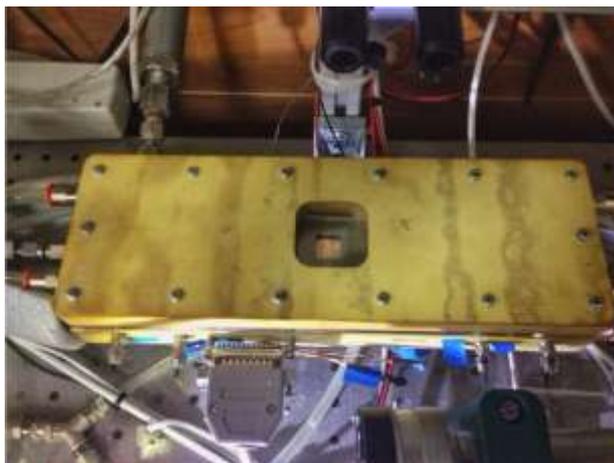


Рисунок 2.4 – Фотокадр рабочего участка.

Вид поперечного разреза рабочего участка представлен на рис.2.5:

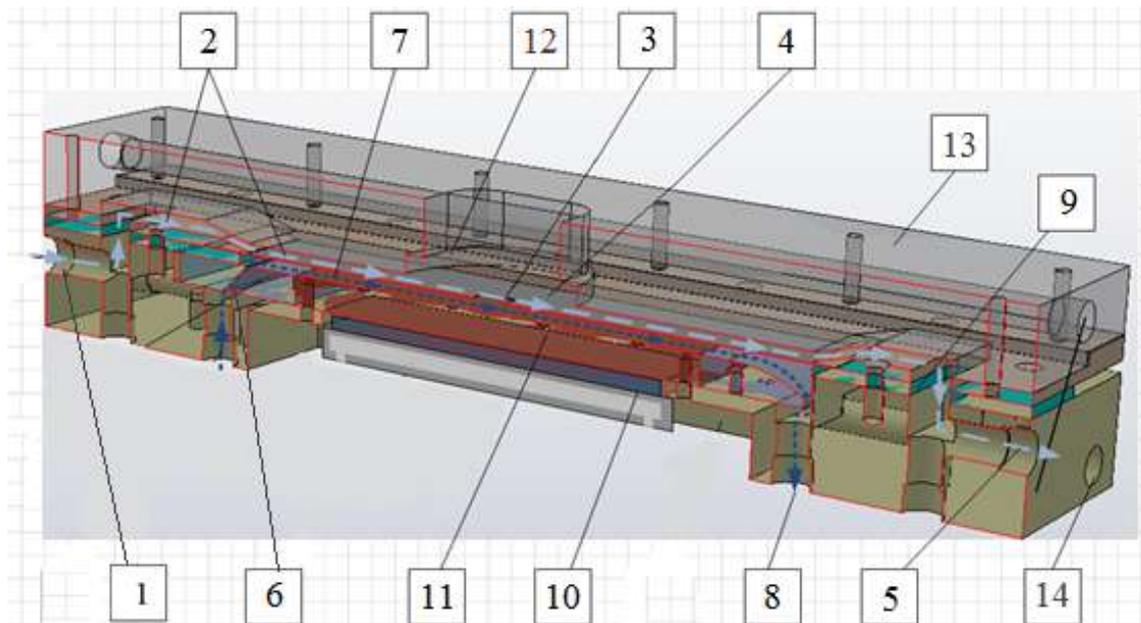


Рисунок 2.5 – Вид поперечного разреза рабочего участка.

1 – входной патрубок газового потока; 2 – газовый канал; 3 – зона испарения; 4 – пластина из нержавеющей стали; 5 – канал выхода парогазовой смеси; 6 – жидкостное 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.

Газ (воздух) поступает в рабочий участок через патрубок 1 и попадает в газовый канал 2 (рис.2.5) прямоугольного поперечного сечения (высотой 3мм, шириной 40мм, длиной 150мм). 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. Жидкость (этанол) проходя жидкостное сопло 6, попадет в жидкостную камеру 7 далее в зону испарения 3 (поверхности раздела «жидкость-газ») и удаляется из рабочего участка, с помощью жидкостного насоса, через зону слива 8. Высота жидкостного канала может изменяться от 1 до 5 мм посредством замены вставки 9, которая формирует высоту жидкостной камеры 7. Температура жидкости

контролируется термоэлектрическим модулем 10, в диапазоне температур от 15 до 35°C. 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 120 мм, 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.

Геометрические размеры газового канала: высота 3 мм, ширина 40 мм, длина 150 мм. Ширина жидкостной камеры 40 мм, длина 150 мм. Поверхность испарения может изменяться от 100 мм² до 900 мм², с помощью замены металлической пластины (рис. 2.6), которая разделяет потоки (жидкость - газ) и является верхней стенкой жидкостного канала.

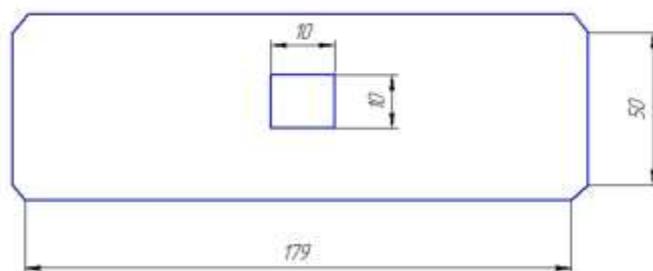


Рисунок 2.6 – Металлическая пластина с квадратным вырезом 10x10 мм

Она изготовлена из нержавеющей стали, с квадратным вырезом по центру, в котором происходит контакт жидкости и газа, а также формируется локальная область испарения.

2.2.3 Контрольно-измерительная система

Общая схема контрольно-измерительной системы представлена на рис.2.7, 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 тепловентилятора.

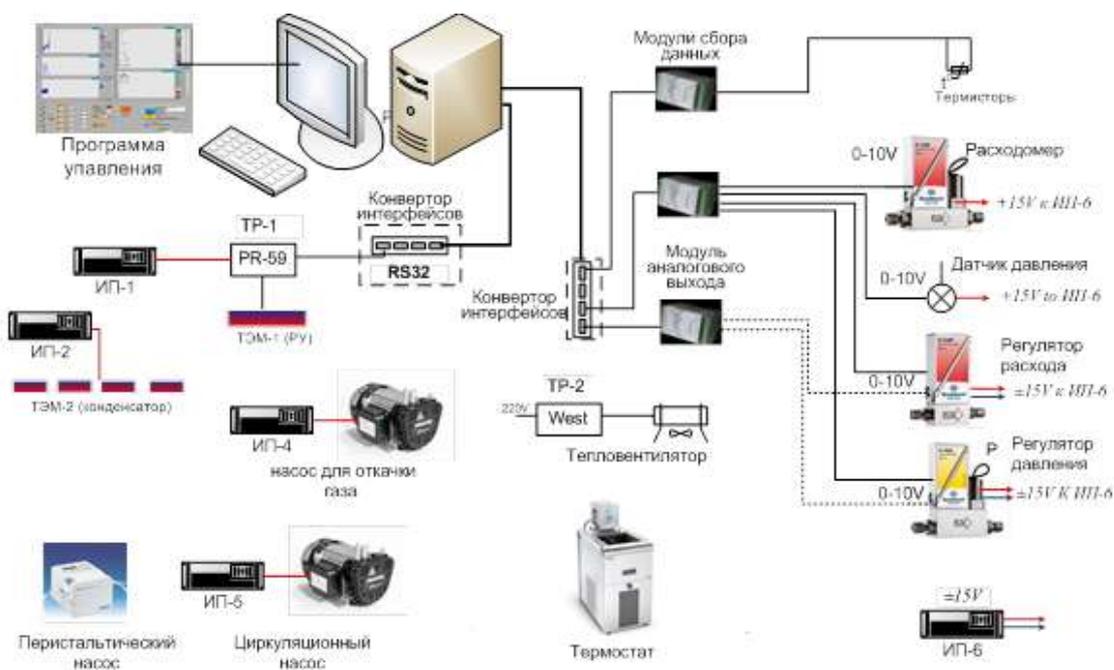


Рисунок 2.7 – Схема контрольно-измерительной системы.

Данные с контрольно-измерительных устройств передаются в ПК через контроллеры с частотой 1 раз в 3 секунды. Термисторы, расходомер, регулятор расхода, регулятор давления, датчик давления, подключены к соответствующим модулям. Перистальтический насос подключен в сеть и управляется механически. На входе в рабочий участок с помощью

контрольно – измерительной программы (управляющей регулятором расхода) устанавливается величина расхода воздуха. 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. 2.8).

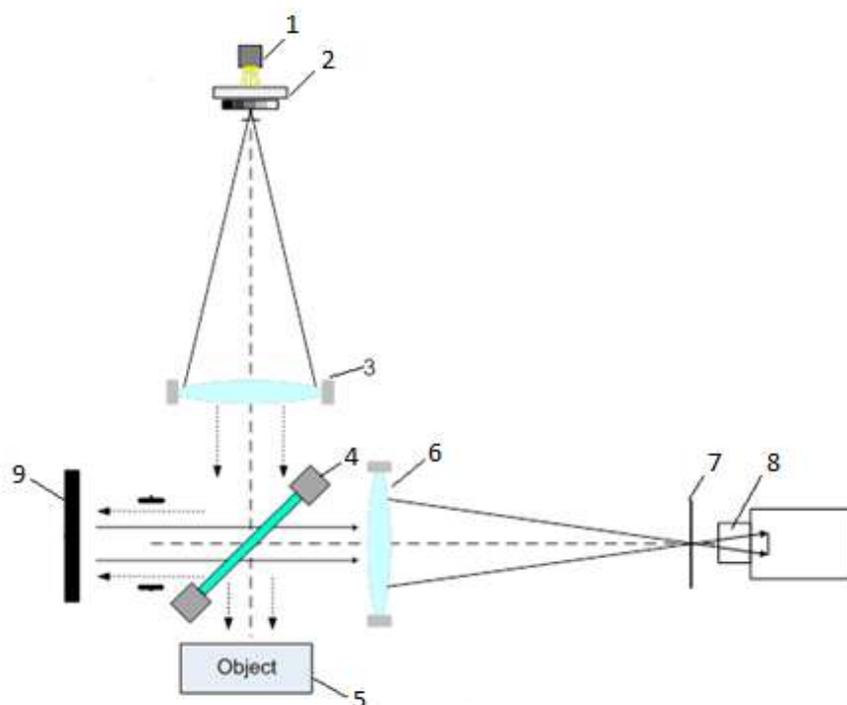


Рисунок 2.8 – Схема теневого метода.

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

В оптической Шлирен 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 цилиндрической 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.

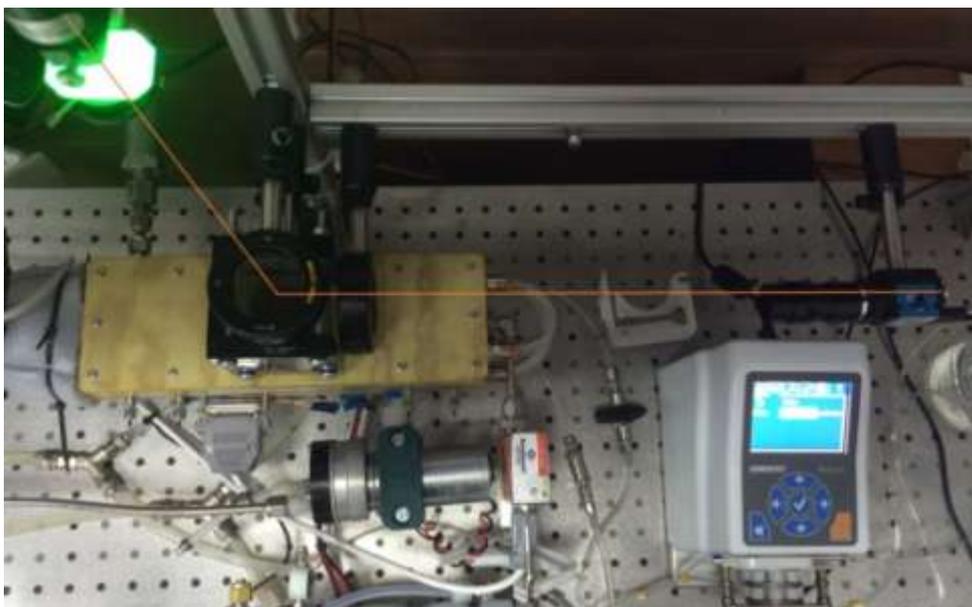


Рисунок 2.9 – Фотография теневого метода.

2.2.5 Методика проведения экспериментальных исследований

Необходимо включить термостат (рис. 2.10), для этого требуется перевести тумблер питания, расположенный на задней стенке микропроцессора, в положение «Вкл». Затем зажать кнопку включения, расположенную на передней панели управления. Для задания температуры необходимо зажать кнопку «Set», расположенную на передней панели и с помощью стрелок «вверх» и «вниз» установить требуемое значение. Температура на термостате будет определять температуру газа во время эксперимента, так как жидкость, нагреваемая термостатом, прокачивается по специальным каналам, расположенным в рабочем участке.



Рисунок 2.10 – Фотокадр термостата

При достижении заданной температуры газа с помощью перистальтического насоса (рис. 2.11) необходимо заполнить жидкостный контур до установления плоской межфазной границы (рис. 2.12). Для этого необходимо перевести тумблер включения, расположенный на задней панели в положение «Вкл», затем нажать оранжевую кнопку включения (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Перистальтический насос

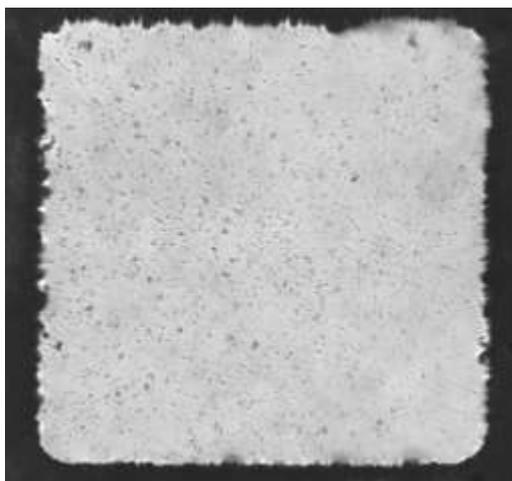


Рисунок 2.12 – Плоская межфазная граница

С помощью клавиш навигации перейти во вторую вкладку (рис. 2.13) и задать требуемое значение расхода жидкости. На дисплее можно наблюдать надпись «Rate», которая определяет направление движения жидкости (вперед или назад). В правом верхнем углу дисплея расположена цифра «1», которая показывает параметры какого из трех каналов настраиваются в данный момент. В данном насосе возможно подавать жидкость по трем каналам, обозначенным цифрами I, II, III.



Рисунок 2.13 – Перистальтический насос вид сверху

После установления плоской межфазной границы с помощью пьезоэлемента нагреваем металлическую подложку, температура которой будет равна температуре жидкости. Для этого необходимо включить источник питания (красная кнопка на рис. 2.14), и, с помощью регуляторов, задать значения тока и напряжения. Если необходимо нагреть жидкость, то красный провод крепится к «+», если жидкость необходимо охладить, то красный провод крепится к «-».

Далее требуется подать газ в рабочий участок, для этого устанавливается напряжение на источнике питания (рис. 2.14), описание данного процесса приведено выше. Расход на мембранном насосе (рис. 2.15) регулируется с помощью массового регулятора расхода (рис. 2.16), который управляется программой «Control NL-4A0» (рис. 2.17). Для задания требуемого расхода газа на входе в рабочий участок необходимо вписать значение в программе и нажать клавишу «послать».



Рисунок 2.14 – Источник питания

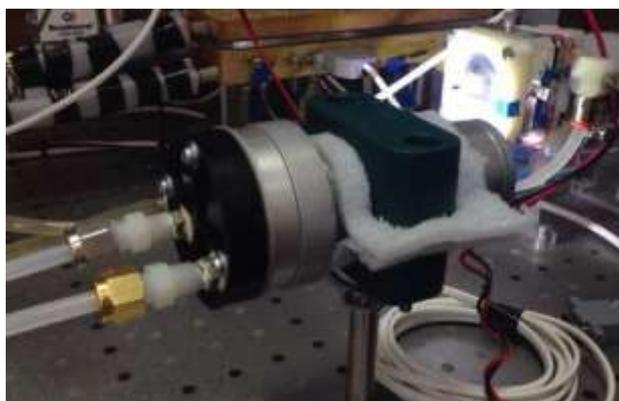


Рисунок 2.15 – Мембранный насос



Рисунок 2.16 – Регулятор расхода «Bronkhorst»



Рисунок 2.17 – Интерфейс ПО «Control NL-4A0»

Температура газа измеряется с помощью термисторов, установленных по длине исследуемой зоны, а также на входе и выходе из рабочего участка. Температура жидкости измеряется в центре медной пластины. Значения температур, а также расхода газа на входе и расход парогазовой смеси на выходе регистрируется с помощью программного обеспечения «Agilent BenchLink DataLogger» (рис. 2.18):

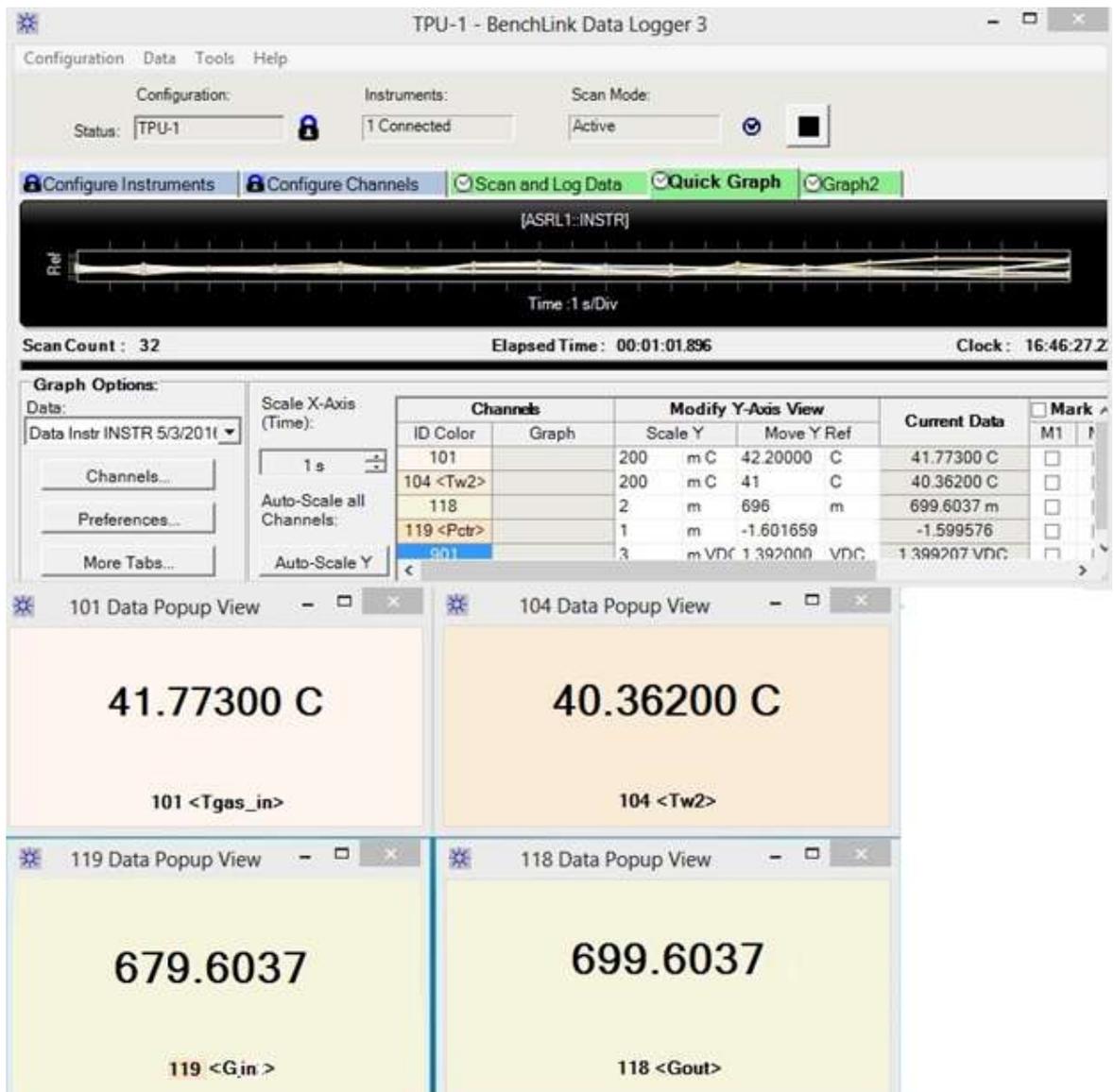


Рисунок 2.18 – Интерфейс ПО «Agilent BenchLink DataLogger»

После запуска программы откроется рабочее окно (рис. 2.19):

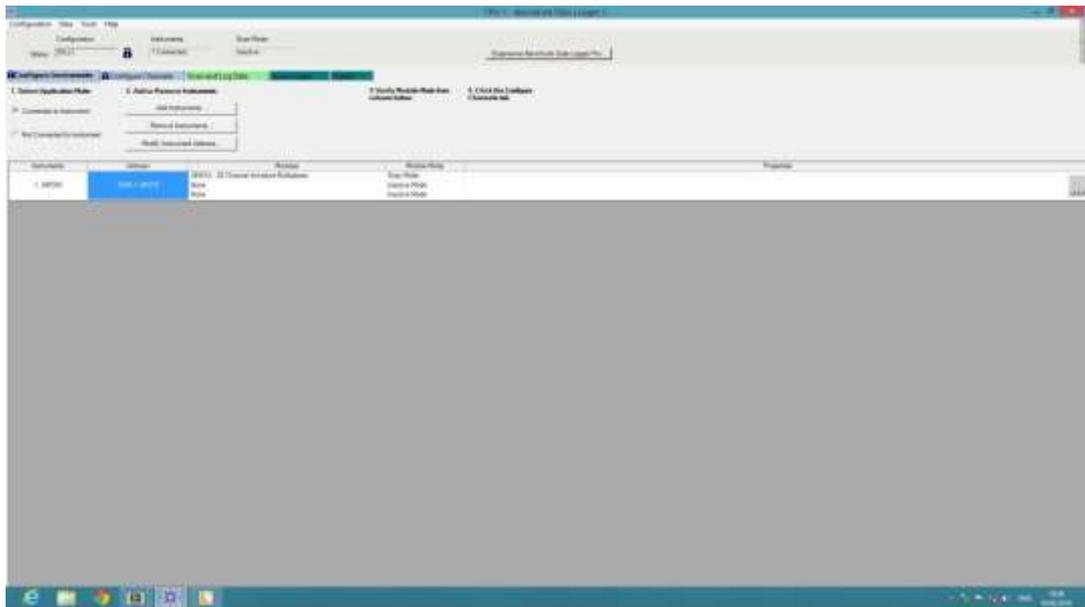


Рисунок 2.19 – Рабочее окно ПО «Agilent BenchLink DataLogger»

Далее необходимо перейти во вкладку «Configure channels» и поставить «v» на параметрах, которые необходимо измерять в ходе проведения экспериментальных исследований (рис. 2.20):

Channels		Enable Channel		Measurement				Scaling (Mx + B)		
Instruments	Scan	Name	Function	Range	Res	More	Scale	Gain (M)	Offset(B)	Label
1. ASRL1::INSTR										
34901A										
101	<input checked="" type="checkbox"/>	Tgas_in	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
102	<input type="checkbox"/>	Tliq_in	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
103	<input checked="" type="checkbox"/>	Tw1	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
104	<input checked="" type="checkbox"/>	Tw2	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
105	<input type="checkbox"/>	Tw3	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
106	<input type="checkbox"/>	Tw4	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
107	<input type="checkbox"/>	Tliq	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
108	<input type="checkbox"/>	Tamb	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
109	<input type="checkbox"/>	Tliq_out	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
110	<input type="checkbox"/>	Tgas_out	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
111	<input type="checkbox"/>	Tcss_in	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
112	<input type="checkbox"/>	Tcss_out	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
113	<input type="checkbox"/>	Tcss_sep	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
114	<input type="checkbox"/>	Tcss_cs_in	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
115	<input type="checkbox"/>	Tcss_condt	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
116	<input type="checkbox"/>	Tcss_cs_out	Temp 10K Therm	None	C	...	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	C
117	<input type="checkbox"/>	Gin	DC Voltage	Auto	5.5	...	<input checked="" type="checkbox"/>	100	0	None
118	<input checked="" type="checkbox"/>	Gout	DC Voltage	Auto	5.5	...	<input checked="" type="checkbox"/>	150	0	None
119	<input checked="" type="checkbox"/>	Pctr	DC Voltage	Auto	5.5	...	<input checked="" type="checkbox"/>	100	0	None
120	<input type="checkbox"/>	Pin	DC Voltage	Auto	5.5	...	<input checked="" type="checkbox"/>	160	0	None
121	<input type="checkbox"/>		DC Current	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC
122	<input type="checkbox"/>		DC Current	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC
Computed Channel										
901			Add	118	118	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC
Add										

Рисунок 2.20 – Выбор измеряемых параметров

Затем во вкладке «Scan and Log Data» необходимо нажать кнопку пуск (выделена на рис. 2.21) и перейти во вкладку «Quick Graph» для непрерывного мониторинга измеряемых параметров (рис. 2.18).

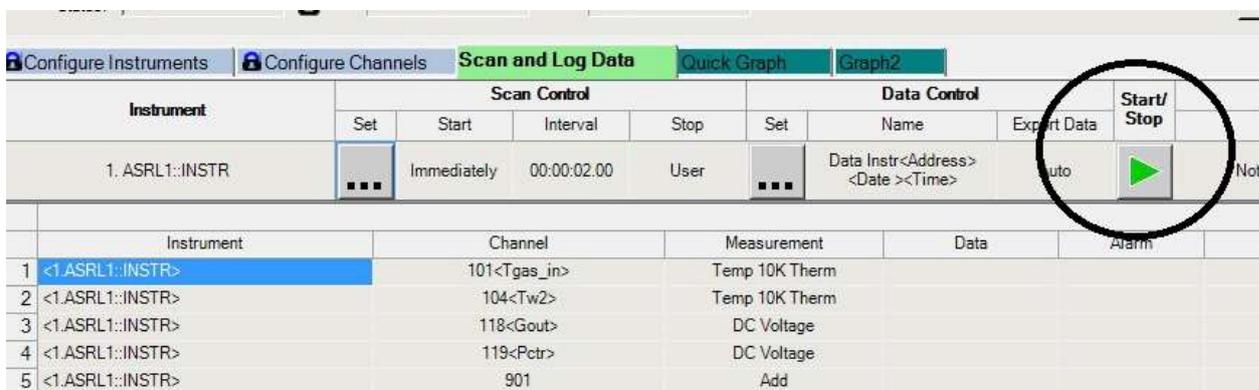


Рисунок 2.21 – Вкладка «Scan and Log Data»

Выводы по второй главе

Приведена схема экспериментальной установки с описанием элементов. Основными элементами установки являются рабочий участок, газовый и жидкостной контур: газовый баллон, регулятор расхода, расходомер, перистальтический насос, система термостабилизации: термостат, термоэлектрическая сборка, контрольно-измерительная система: ПК, регистратор данных, источники питания, шлюз система. Разработана методика проведения экспериментов по исследованию испарения неподвижного слоя жидкости в мини-канале под действием потока газа. Точность измерения температур в данной работе составляет 0,1 °С. Точность измерения расхода газа составляет 0,5 % от показаний прибора. Описан принцип действия установки для проведения исследований по испарению в мини-канале.

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

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.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценка актуальности проведения экспериментальных исследований;
- поиск альтернативных способов проведения научных исследований, соответствующих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- составление план-графика;
- определение эффективности исследования.

Научно-исследовательская работа заключается в проведении серии экспериментов на специальном стенде с целью определения массовой скорости испарения неподвижного слоя спирта в мини-канале под действием потока воздуха, но проведение экспериментальных исследований требует

затрат материальных 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) – это комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Применяется для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Внешняя среда включает в себя макро- и микроуровень. В настоящей работе макроуровень отсутствует. Рассмотрим микроуровень:

➤ Спрос, характер спроса

В настоящее время процессы теплопереноса 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 исследователи в области двухфазных течений в мини-каналах.

➤ Поставщики

Поставщиком электронного оборудования является супермаркет цифровой техники «DNS».

➤ Контактная аудитория

Результаты исследования направлены на аудиторию, у которой существует интерес к исследованиям процессов тепло- и массообмена в двухфазных потоках. А также различным предприятиям, в технологической схеме которых присутствуют процессы создания, использования, транспортировки тепловой энергии.

➤ 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, скорости потока газа, толщины слоя жидкости, площади поверхности испарения на динамику испарения. 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
Получение новых результатов.	Большая конкуренция
Применение полученных результатов в	Высокая стоимость оборудования

науке и технике	
Новое высокотехнологическое оборудование	Большое количество дополнительных экспериментов
	Требуется много времени
ВОЗМОЖНОСТИ «О» - Opportunities	УГРОЗЫ «Т» - 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 два независимых способа расчета массовой скорости испарения жидкости под действием потока газа: первый основан на измерении разницы массового расхода газа, измеряемого регулятором давления и расходомером, на входе и выходе из рабочего участка (метод 1), второй способ заключается в измерении расхода жидкости, подаваемой в рабочий участок для поддержания плоской межфазной границы (метод 2).

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

Экспертная оценка позволит определить наиболее эффективный метод обработки данных, применимый к настоящей работе.

Для оценки эффективности используемых методов необходимо задаться параметрами для сравнения, по которым будет построена модель экспертной оценки:

1. Простота;
2. Точность;
3. Показательность;
4. Неимение воздействия внешних факторов;
5. Адаптированность.

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

Таблица 4.2 - Методы расчета теплового потока с нагревательного элемента

№	Название метода
1	измерение разницы массового расхода газа на входе и выходе из рабочего участка
2	измерение расхода жидкости

Таблица 4.3 - Оценка эффективности методов первым экспертом

Название метода	Простота	Точность	Показательность	Неимение воздействия внешних факторов	Адаптированность
Метод 1	7/1	10/5	8/4	6/4	6/4
Метод 2	6/1	5/5	10/4	4/4	4/4

Таблица 4.4 - Оценка эффективности методов вторым экспертом

Название метода	Простота	Точность	Показательность	Неимение воздействия внешних факторов	Адаптированность
Метод 1	4/4	10/5	6/5	5/5	8/5
Метод 2	8/4	6/5	9/5	2/5	6/5

Таблица 4.5 - Оценка эффективности методов третьим экспертом

Название метода	Простота	Точность	Показательность	Неимение воздействия внешних факторов	Адаптированность
Метод 1	4/3	9/5	8/2	5/5	7/5
Метод 2	9/3	2/5	9/2	2/5	2/5

Далее необходимо определить весовой коэффициент W_i , а также оценку эффективности $V_i \cdot W_i$. В случае, если весовой коэффициент равен единице, расчет можно считать верным.

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	Показательность	Неимение воздействия	Адаптированность
---------	-------	----------	----------	-----------------	----------------------	------------------

								внешних факторов			
№		W _i	V _i ·W _i	W _i	V _i ·W _i	W _i	V _i ·W _i	W _i	V _i ·W _i	W _i	V _i ·W _i
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
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
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

Таблица 4.7 - Итоговые экспертные оценки

Название метода	I эксперт	II эксперт	III эксперт	Средняя оценка
Метод 1	7,61	6,71	6,65	6,99
Метод 2	5,72	6,13	3,75	5,2

По результатам оценок трех независимых экспертов, менее удачным принят метод расчета по расходу испарившейся жидкости. По предоставленным параметрам сравнения первое место занимает метод расчета разницы массового расхода газа на входе и выходе из рабочего участка. Проанализировав данные результаты, принимаем для использования первый метод.

4.3 Календарный план

Планирование работ осуществляется следующим образом:

- определение структуры работ;
- определение исполнителей каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Перечень необходимых работ и их исполнителей представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень необходимых работ и определение исполнителей каждой работы

№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Выбор тематики и направления экспериментальных исследований	Руководитель, студент
2	Поиск научных публикаций, проведение и анализ обзора литературы	Студент
3	Составление плана проведения экспериментальных исследований и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач	Руководитель, студент
4	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ этилового спирта	Руководитель, студент
5	Сборка экспериментальной установки	Руководитель, студент
6	Загрузка и установка необходимого ПО	Руководитель, студент
7	Проведение экспериментальных исследований	Студент
8	Обработка экспериментальных данных	Студент
9	Повторение экспериментов с целью перепроверки и оценки степени повторяемости эксперимента	Студент
10	Обработка дополнительных данных	Студент
11	Сравнение полученных результатов с опубликованными ранее, определение новизны и написание выводов	Руководитель, студент
12	Оформление 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.

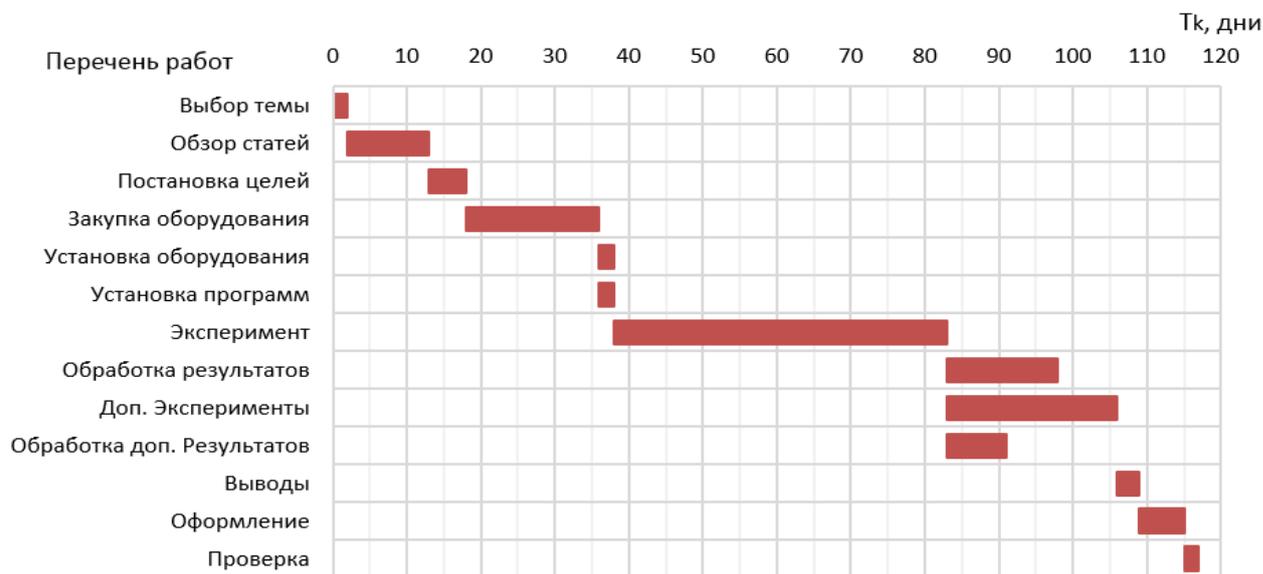


Рисунок 4.1 – График Ганта

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

4.4 Смета. Бюджет проекта

Существует необходимость обеспечения полного и достоверного отражения всех видов расходов, с этой целью составляется смета проекта. В процессе формирования сметы проекта используются следующие статьи затрат:

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

Стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, относится к материальным затратам:

- материалы, приобретаемые для создания научно-технического стенда;

- экспериментальное оборудование;
- продукция, предназначенная для обеспечения нормального технологического процесса;
- материалы, используемые в качестве объектов исследований;
- канцелярские принадлежности.

Стоимость каждого материала определяется по формуле:

$$C = K \cdot Ц,$$

где K – объем потребления, шт.; $Ц$ – стоимость единицы материала, руб.

Таблица 4.10 - Материальные затраты проекта

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
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 «Canon»	Шт.	63743	1	63743
Объектив для фотокамеры «Sigma ZF 115mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro Canon F»	Шт.	32990	1	32990
б) Источник света «etmunt optic worldwide mi-150»	Шт.	6430	1	6430
7) Компьютер intel core i7-2600k ОЗУ 16 гб	Шт.	39990	2	79980
8) Монитор «HP H236HLbmjd»	Шт.	9250	2	18500
9) Клавиатура Defender	Шт.	970	2	1940
10) Мышь Microsoft	Шт.	349	2	698
11) Термисторы	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»	Шт.	3909	1	3909
21) Клей Герметик МОМЕНТ силикон	Шт.	117	1	117

водостойкий				
22) Канцелярские товары	Шт.	500	1	500
24) Электроэнергия	кВт/ч	4,25	11199	47596
ИТОГО:				525614

Затраты на электроэнергию включают:

- потребление света;
- использование дополнительного оборудования.

Расходы на электроэнергию представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Затраты на электроэнергию

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

Амортизация – учет износа основных средств и нематериальных активов по мере их морального или физического старения при расчете стоимости 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	$242 \cdot 8 =$	$62 \cdot 8 = 544$	$161 \cdot 8 =$	$186 \cdot 8 =$	$186 \cdot 8 =$

оборудования в год, ч	+5·7=1971		=1288	=1488	=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				

Работа руководителя ВКР оплачивается почасово. Норма времени - 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: $C_{сум.} = 6600 + 1980 = 8580 \text{ руб.}$

Затраты на выполнение проекта приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 - Затраты на выполнение проекта

Наименование	$C_m, \text{руб.}$	$C_{з.п.}, \text{руб.}$	$C_{ам.}, \text{руб.}$	$C_{сум.}, \text{руб.}$
Выполнение проекта	525614	8580	6556	540750

Общие затраты на реализацию данного проекта составят 540750 рублей.

4.5 Ресурсоэффективность

В таблице 4.15 приведено определение бюджета затрат на выполнение исследовательского проекта по трем вариантам: первый включает в себя использование высокоскоростной видеокамеры стоимостью 1339477 руб.,

второй – использование имеющегося фотоаппарата, третий подразумевает, что установка уже собрана и потребности в дополнительном оборудовании нет.

Таблица 4.15 – 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:

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

Таблица 4.16 - 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:

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

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

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

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

4.6 Экономическая эффективность

В настоящей работе выполнен SWOT-анализ с исследованием среды проекта. Проведена экспертная оценка методов измерения массовой скорости испарения, по результатам которой было решено использовать: измерение разницы массового расхода газа на входе и выходе из рабочего участка с помощью расходомеров.

Определена структура работ в рамках научного исследования, продолжительность и участники каждой работы. Построен график Ганта, а также диаграмма 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 СТУДЕНТА

- 1) Afanasyev I. A., Orlova E. G., Feoktistov D.V.. Evaporation of stationary alcohol layer in minichannel under air flow // European Physical Journal Web of Conferences, 2015, vol. 82, 01054.
- 2) Afanas'ev I., Feoktistov D., Lyulin Yu V.; I.; Chachilo E. S.; Kabov O. A.; Kuznetsov G. V.. Measuring the Rate of Local Evaporation from the Liquid Surface under the Action of Gas Flow // Technical Physics Letters, 2015, vol. 41, №. 7.
- 3) Афанасьев И. А., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В.. Испарение неподвижного слоя спирта в миниканале под действием потока воздуха // Теплофизические основы энергетических технологий: сборник статей V Всероссийской научной конференции с международным участием, Томск, 15-17 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 38-43.
- 4) Афанасьев И.А., Феоктистов Д.В., Кравчук А.С., Жаравин З.Е.. Динамический краевой угол при смачивании твердой подложки дистиллированной водой // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С.75-77.
- 5) Афанасьев И.А., Феоктистов Д.В., Люлин Ю.В., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В.. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // Письма в ЖТФ. - 2015. – Т41.–Вып.14 - С. 1-8.
- 6) Афанасьев И.А., Жаравин З.Е., 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.