

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Измерение толщины слоя жидкости конфокальным оборудованием

УДК 536.252:536.253:536.246:004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Працкевич Владислав Александрович		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
Р2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
Р3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
Р4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
Р5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
Р8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
Р9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.

P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами, использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
<i>Специальные профессиональные</i>	
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

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

Институт Энергетический
Направление подготовки **140100 Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра «Теоретической и промышленной теплотехники»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ТПТ ЭНИН
Г.В. Кузнецов

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Б2Б	Працкевичу Владиславу Александровичу

Тема работы:

Измерение толщины слоя жидкости конфокальным оборудованием

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

14 июня 2016 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования является
теплообмен при испарении слоев жидкости.

Предмет исследования – влияние теплового потока на скорость испарения и коэффициент теплоотдачи в условиях испарения слоев жидкости с поверхности из нержавеющей стали.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Разработка методики проведения экспериментальных исследований испарения тонких слоев жидкости с использованием конфокального датчика.</p> <p>Проведение серии экспериментальных исследований испарения слоев дистиллированной воды и на горизонтальной подложке.</p> <p>Анализ полученных результатов по испарению жидкости, оценка влияния значимых факторов на процесс и характеристики испарения</p>
--	--

<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация</p>
--	--------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
<p>Финансовый менеджмент</p>	<p>Попова С.Н., доцент кафедры менеджмента</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Дашковский А.Г., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</p>

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>8 февраля 2016 года</p>
--	-----------------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент кафедры ТПТ</p>	<p>Феоктистов В.Н.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5Б2Б</p>	<p>Працкевич В.А.</p>		

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа 144с., 42 рисунка, 26 таблиц, 50 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: испарение, плёнка жидкости, толщина слоя, массовая скорость испарения, температурный перепад, поверхность раздела фаз, коэффициент теплоотдачи, конфокальная лазерная сканирующая микроскопия.

Объектом исследования является теплоперенос в условиях испарения слоя жидкости.

Цель работы – экспериментальное определение скорости испарения и коэффициента теплоотдачи с использованием конфокального датчика в условиях испарения тонких слоев жидкости.

Проводились экспериментальные исследования по определению зависимостей толщины слоя жидкости от времени, массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости, коэффициента теплоотдачи от времени.

В результате исследования получены экспериментальные данные о влиянии толщины слоя на скорость испарения, коэффициент теплоотдачи. Подтверждена возможность применения конфокального датчика при измерении значения толщины слоя жидкости в процессах испарения тонких слоёв жидкости.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИСПАРЯЮЩЕГОСЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ.....	15
1.1 Испарение жидкости.....	15
1.2 Методы определения толщины слоя жидкости.....	22
1.2.1 Метод касания	22
1.2.2 Электроемкостный метод.....	23
1.2.3 Метод электропроводности	24
1.2.4 Радиационный метод	25
1.2.5 Оптический метод.....	26
1.3 Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия.....	30
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ.....	43
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА	47
2.1 Планирование экспериментальных исследований.....	47
2.1.1 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований	47
2.1.2 Основные размерные параметры воздействия.....	48
2.2 Описание экспериментальной установки.....	49
2.3 Описание методики.....	55
2.3.1 Методика проведения эксперимента по измерению толщины слоя жидкости и температур рабочего участка в процессе испарения и кипения (при замене линейного актуатора с щупом на конфокальный датчик).....	55
2.3.2 Методика расчета теплового потока, скорости испарения с поверхности слоя жидкости и коэффициента теплоотдачи	56
2.4 Программное обеспечение	57

2.4.1 NI LabView SignalExpress.....	57
2.4.2 IFD2451 Tool V3.1.2.....	60
2.5 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента	70
2.6 Точность измерения основных параметров	70
ВЫВОД ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ	71
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
3.1 Толщина слоя жидкости	
3.2 Удельная массовая скорость испарения	
3.3 Коэффициент теплоотдачи.....	
3.4 Оценка погрешности измерений	
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	73
Введение.....	73
4.1 SWOT-анализ.....	73
4.2 Экспертная оценка	76
4.3 Календарный план	80
4.4 Смета. Бюджет проекта	84
4.5 Ресурсоэффективность	88
Выводы по главе.....	90
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	
Введение.....	
5.1 Производственная безопасность	
5.1.1 Вредные физические производственные факторы.....	
5.1.2 Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды.....	
5.2 Экологическая безопасность	
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	
Приложение А	

ВВЕДЕНИЕ

Процессы тепломассобмена, протекающие при фазовых превращениях жидкости, широко распространены в различных отраслях народного хозяйства: в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, атомной и тепловой энергетике, в ракетной и холодильной технике, в металлургии, и т.д. В тоже время развитие новых современных отраслей и совершенствование уже существующих в традиционных областях требует увеличения эффективности охлаждающих систем, повышения плотности отводимых тепловых потоков, интенсификации теплообмена. Большие трудности вызывает охлаждение теплонапряженных поверхностей диверторов ТОКАМАК, высокофорсированных устройств силовой электроники, оптических элементов квантовых генераторов (зеркала мощных лазеров), в ракетной технике и в тепломассобменных аппаратах тепловой и атомной энергетике, когда плотность отводимых тепловых потоков достигает нескольких МВт/м² и более[1].

В тепловой и атомной энергетике испарение жидкости на твердой поверхности – один из основных процессов в производстве электрической и тепловой энергии. При подводе теплоты в парогенераторах котельных, ТЭЦ, ГРЭС, АЭС и др. к нагреваемой жидкости (питательной воде), происходят процессы нагрева, кипения и испарения. Фазовый переход воды из жидкого в газообразное состояние лежит в основе процессов, протекающих в барабанах котлов и в испарительных поверхностях прямоточных котлоагрегатов.

Испарительная поверхность нагрева – это часть змеевиков циркуляционного контура прямоточного котла, в которых происходит переход рабочего тела из жидкой фазы в газообразную (парообразование) [2]. Испарительная поверхность составляет водопаровую часть прямоточного котла.

Расположение точки начала пароперегревательной поверхности, которая разделяет испарительную поверхность и перегревательную часть, может варьироваться по следующим причинам:

1. Изменение паропроизводительности
2. Тепловая нагрузка котлоагрегата
3. Расход питательной воды

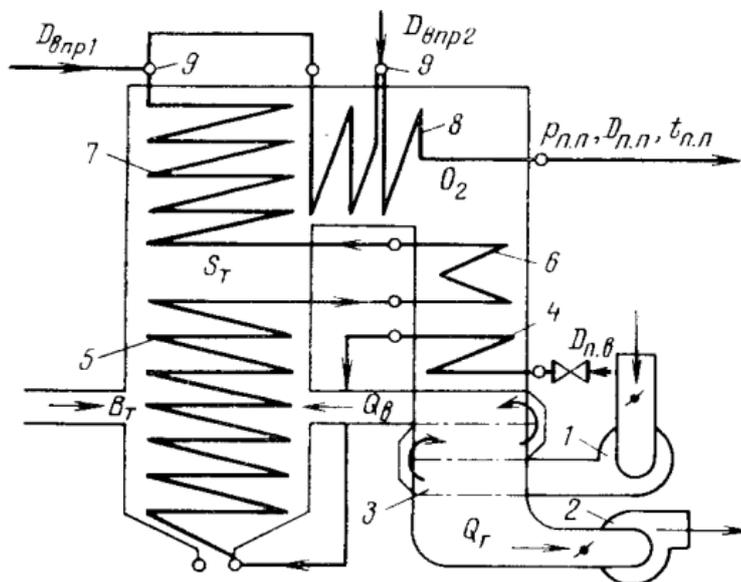


Рисунок 1 – Принципиальное устройство прямоточного котла [2].

1 – дутьевой вентилятор, 2 – дымосос, 3 – воздухоподогреватель, 4 – водяной экономайзер, 5 – нижняя радиационная (испарительная) часть, 6 – переходная зона, 7, 8 – радиационный и конвективный пароперегреватель, 9 – парохладители

Изменение расхода питательной воды в прямоточных котлах оказывает прямое влияние на расход, температуру и давление продукта (перегретый пар). При увеличении расхода, точка начала перегревательной части смещается в большую сторону, увеличивая зону нижней радиационной части (испарительной поверхности). В свою очередь, это меняет условия протекания процесса теплопередачи, что, в первую очередь, усложняет регулирование выходных параметров котла и требует тщательного подхода к проектированию поверхностей нагрева [2].

Для понимания и описания физического механизма процесса испарения и кипения питательной воды в испарительных поверхностях прямоточных котлоагрегатов, необходимо обратиться к экспериментальным

исследованиям в области малой энергетики. В настоящее время существует проблема недостаточного количества экспериментальных данных в области процессов испарения и кипения тонких слоёв жидкости, что мешает описать более точно процессы теплообмена, протекающие не только в испарительных частях парогенераторов, но и в других теплообменных аппаратах. Решение этой проблемы позволит создать научные основы для проектирования и конструирования эффективных поверхностей нагрева, испарения и перегрева, что положительно повлияет на регулирование прямоточных котлоагрегатов.

Для проведения экспериментальных исследований в области малой энергетики требуются колоссальные затраты денежных средств на лабораторное оборудование, оплату труда высококвалифицируемых специалистов в области знаний процессов теплообмена. Теоретические основы процессов кипения и испарения разрабатываются не один десяток лет, в работах задействованы многие научные коллективы с разных стран. В настоящий момент эти основы не разработаны на уровне прогностического моделирования. Одна из причин отсутствия аналитических выражений в области процессов кипения и испарения – сложность физического определения ключевых переменных, таких как, например, толщина слоя испаряющейся жидкости. По этой причине определение скорости испарения жидкости, представляет собой задачу, которая требует точных и значений толщины слоя жидкости.

Существуют различные методы фиксации значения толщины слоя жидкости. Следует выделить основные: методы касания, электроемкостные методы, методы электропроводности, радиационные методы, оптические методы [3]. Последние распространены в силу своих преимуществ: бесконтактность, возможность получать значения с частотой до 10 кГц, высокая точность, в зависимости от класса прибора точность может достигать до 10^{-8} м, компактность – в большинстве своем сенсоры малогабаритны и могут устанавливаться на многих лабораторных стендах, и, наиболее важное

для научного сотрудника – широкие возможности программного обеспечения, поставляемое изготовителем в комплекте с датчиком[4].

Все эти явные преимущества оптического метода побудили заменить линейный актуатор с щупом (касательный метод) на конфокальный датчик (оптический метод) в установке испарения тонких слоёв жидкости, где экспериментально определялись зависимости массовой скорости испарения от времени, коэффициента теплоотдачи от времени, толщины плёнки жидкости от времени.

Цель работы экспериментальное определение скорости испарения и коэффициента теплоотдачи с использованием конфокального датчика в условиях испарения тонких слоев жидкости.

Применить датчик ConfocalDT 2451 для измерения толщины слоя жидкости в процессе испарения тонкого слоя жидкости при различных условиях и построить ключевые зависимости. Вводные параметры эксперимента: температура подложки, материал подложки, испаряемая жидкость (дистиллированная вода), начальная и конечная толщина слоя жидкости.

При выполнении этой цели решались следующие задачи:

1. Анализ научных публикаций по темам: процессы тепломассобмена, протекающие при испарении тонких слоёв жидкости, измерение толщины слоя жидкости различными методами.
2. Разработка методики измерения толщины слоя жидкости с помощью конфокального датчика.
3. Проведение серии экспериментов по измерению толщины слоя жидкости.
4. Определение зависимостей скорости испарения жидкости, изменение коэффициента теплоотдачи и толщины слоя от времени.

Объект исследования – тепломассоперенос в условиях испарения слоя жидкости.

Предмет исследования – зависимости скорости испарения и коэффициента теплоотдачи в условиях испарения слоя жидкости.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИСПАРЯЮЩЕГОСЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ

Определение толщины слоя жидкости в процессах испарения и кипения тонких плёнок жидкости представляет научный интерес для многих исследователей. Определение основных параметров процесса испарения, таких как температура поверхности нагрева, температура жидкости, температура на границе фаз жидкость-газ, температура газа над поверхностью плёнки жидкости, высота слоя в каждый момент времени и многие другие – неполный перечень интересующих величин, необходимых для качественного анализа протекающих процессов на рабочем участке. В свою очередь, обработка полученных результатов позволит построить необходимые зависимости скорости испарения от времени, толщины слоя жидкости от времени, коэффициента теплоотдачи от времени и другие. Что даст возможность описать поведение основных характеристик процесса и, возможно, получить аналитические выражения зависимостей между ними.

1.1 Испарение жидкости

Испарение жидкости – процесс, который повседневно встречается в жизни. При соприкосновении поверхности жидкости с газом молекулы жидкости в процессе испарения покидают её поверхность и диффундируют в газ, находящийся над плёнкой жидкости, и смешиваются с молекулами газа. Испарение в плёнке жидкости, при котором образуются паровые пузырьки на твердой поверхности, называется кипением. Пар, образующийся на твердой поверхности при обычном кипении воды, при малых температурах поверхности почти незаметен. При увеличении количества подводимого тепла к жидкости пузырьки пара укрупняются и заметны невооруженным глазом. Увеличивая тепловой поток, подводимый к воде, возможен случай кипения под поверхностью плёнки жидкости. В таком случае паровые пузырьки, образуясь на поверхности, поднимаются к границе раздела фаз,

попутно образуя брызги, и создают над плёнкой жидкости паровое пространство [5].

Этот случай кипения обусловлен твердыми частицами или другими ядрами, на которых формируются паровые пузырьки. Поэтому этот случай также получил название ядерное кипения.

Другой случай кипения – плёночное кипение. Встречается, например, в первом стадии охлаждения раскаленного металлического стержня при помещении его в жидкость (воду). Сразу образуется паровой слой на поверхности металлического стержня, отличающийся от пузырьков, которые образуются при ядерном кипении, только большим начальным объемом. Толщина плёнки будет возрастать после разрыва парового слоя на поверхности стержня и процесс будет повторяться (явление Лейденфроста – постоянное плёночное кипение) до тех пор, пока стержень не охладится до ядерного кипения [5].

В [6] рассматривается температурная зависимость скорости испарения и кипения жидкостей в зависимости от условий: свободная поверхность или твердая поверхность нагрева. Для описания процесса испарения жидкости используется теория трансляционного движения. В работе предполагается, что колебательные процессы молекул в жидкости, как и в кристаллах, заключаются в отклонениях их от положения равновесия. Так же вводится предположение, что увеличение температуры жидкости уменьшит время устойчивого положения молекул, увеличит частоту перескока и повысит вероятность вырывания молекулы из плёнки жидкости в область газа. Соответственно, сделано заключение, что скорость испарения жидкости будет возрастать. На основании этих условий и допущений в работе получены теоретические зависимости, которые позволяют получить значения скорости испарения жидкости.

Из теории трансляционного движения, разработанной Я.И. Френкелем [7], следует, что время τ «оседлого» пребывания молекулы вблизи положения равновесия определяется уравнением

$$\tau = \tau_0 e^{E_0/kT} \quad [6],$$

где τ_0 – время колебаний молекул.

Выражение для перескоков молекул можно представить как

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0 e^{E_0/kT}} = f_0 e^{-E_0/kT} \quad [6],$$

где $f_0 = \frac{1}{\tau_0}$.

Вероятность выхода молекулы из плёнки жидкости в газовое пространство

$$P = \frac{f}{f_0} = \frac{1}{e^{E_0/kT}} = e^{-E_0/kT} \quad [6],$$

Из этого уравнения следует, что при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$ вероятность P будет варьироваться в пределах $0 \leq P \leq 1$. На основании этого сделан вывод, что с увеличением температуры будет возрастать скорость испарения жидкости.

В заключение этой работы указано, что скорость испарения с поверхности нагрева в результате функционирования действующих центров кипения будет определяться следующим выражением

$$\nu_{\omega s} = \nu(T_{\omega}) = \nu(T_s) \cdot e^{\frac{E_0(T_{\omega}-T_s)}{kT_{\omega}T_s}} \quad [6],$$

а суммарная скорость испарения насыщенного пузырькового кипения следующей зависимостью

$$\nu_{\omega} = \nu_{\omega s} - \nu_s = \nu_{s0} \cdot e^{\frac{L\mu(T_s-T_0)}{RT_0T_s}} \cdot (e^{\frac{CL\mu\Delta T}{RT_{\omega}T_s}} - 1) \quad [6].$$

В [8] проведен анализ корректности структуры модифицированного уравнения неэквимолярной массоотдачи для описания наиболее характерных неэквимолярных процессов: испарения и конденсации чистых веществ в среде инертного газа. Результатом этого анализа является вывод, что использование модифицированного уравнения неэквимолярной массоотдачи позволит упростить технологию получения обобщающих уравнений для частных случаев (испарение, кипение, конденсация). Модифицированная структура уравнения массоотдачи, полученная на основе последовательного

вывода и анализа интегрального уравнения диффузионного пограничного слоя, является универсальной, применимой для описания произвольных массообменных процессов.

При процессах капельного испарения в работе [9] использовалась следующая экспериментальная установка

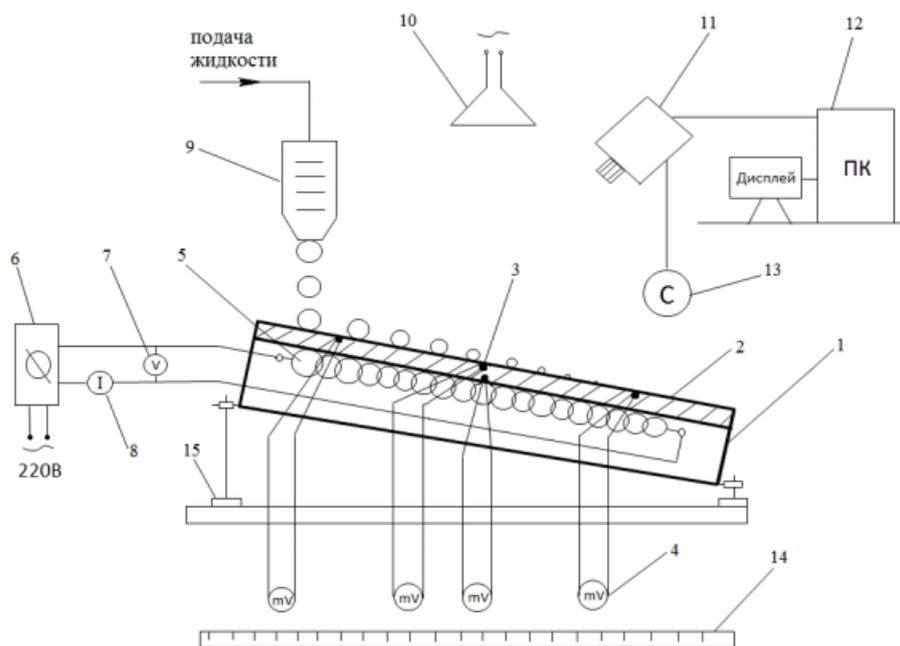


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема установки при исследовании процессов капельного испарения [9]

Экспериментальная установка состоит из термоизолированного корпуса 1 экспериментального аппарата, с нагреваемой поверхностью 2, представляющую собой стальную пластину размером 550x85x8 мм. На поверхности пластины зачеканены термопары 3 – три с наружной поверхности и одна с внутренней, которые выведены на милливольтметры 4, что позволяет контролировать температуру поверхности нагрева. Внутри корпуса находится нагревательный элемент 5, запитанный от сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор 6. Количество тепла, выделяемое нагреваемой поверхностью (мощность нагревателя), контролируется вольтметром 7 и амперметром 8. На нагреваемую поверхность подается жидкость в виде капель определенного размера из капельного оросителя 9. Над установкой расположен источник освещения 10.

Весь эксперимент записывается на скоростную видеокамеру 11, подключенную к персональному компьютеру с дисплеем 12. Время испарения и длина пробега капли контролируется секундомером 13 и линейкой 14. Экспериментальный аппарат снабжен отжимными винтами 15, позволяющими менять угол его наклона [9].

Данную схему можно приспособить и для исследования процессов, протекающих при испарении неподвижных слоёв жидкости, достаточно убрать капельный ороситель и оградить поверхность нагрева стенками нужной высоты для возможности нанесения плёнки жидкости. Полученные результаты экспериментальных исследований на вышеописанной установке в работе [9] позволили предложить адекватную физическую модель процесса капельного испарения и соответствующую ей математическую модель.

В научной работе [10] исследовалось волновое течение испаряющейся плёнки жидкости. Численным методом исследованы процессы волнообразования и теплопереноса в ламинарной стекающей плёнке жидкости при наличии испарения. Для описания нелинейных волн в жидкой плёнке применена интегральная модель, модифицированная с учетом фазового превращения. Также в этой работе приведено численное моделирование волновых режимов течения неизотермической плёнки при наличии испарения на межфазной поверхности. В заключение работы отмечено, что на поверхности испаряющейся пленки развиваются естественные волны, обусловленные неустойчивостью течения. Помимо этого, впервые изучена эволюция возбужденных волн в испаряющейся пленке в широком частотном диапазоне и указано, что амплитуда развитых волн падает с увеличением расстояния.

Тщательное изучение процессов тепломассопереноса, таких как испарение и кипение, происходящие в неподвижной плёнке жидкости, могут внести новые входные параметры эксперимента и уточнить результаты, полученные в [10].

В статье [11] также рассматривается течение испаряющейся плёнки жидкости, которое исследуется численным методом. В работе представлен численный алгоритм определения положения термокапиллярной границы тонкого слоя жидкости, стекающего по наклонной, неравномерно нагретой подложке. Приведены результаты численного исследования испарения плёнки жидкости (этанол) в случае нестационарного и неоднородного нагрева подложки, а также при различных значениях угла её наклона. Проведено сравнение результатов расчетов в случае использования математических моделей конвекции Обербека-Буссинеска и Навье-Стокса. Результаты, полученные при исследованиях процесса испарения неподвижной плёнки жидкости, могут также внести коррективы в численные исследования, проводимые в [11].

Тщательно к исследованию процессов, происходящих на границе раздела жидкость-пар, подходят в научной работе [12]. В этой статье выделяют 4 основных групп условий, которые используются при построении математических моделей движения и тепломассопереноса на межфазной границе: 1) кинематические условия, в записи которых не участвуют ускорения, а только скорости; 2) динамические условия, задающие баланс сил на границе; 3) условие баланса потоков энергии и 4) термодинамические условия. Далее рассматриваются каждая из групп условий, влияющая на процесс тепломассопереноса на границе раздела жидкость-пар.

В заключении работы указано то, что из законов сохранения массы, количества движения и энергии выведены условия, которым должны удовлетворять поля скоростей, давлений, концентраций и температур в жидкой и газовой фазах на разделяющей эти фазы границе. При этом жидкость может испаряться и переноситься в газе как примесь. В полученных соотношениях установлено, какому физическому явлению соответствует каждый из входящих в него слагаемых. В качестве примера рассмотрена задача испарения подогреваемого шарового слоя жидкости. Приведены примеры расчетов. Установлено, что связанные с

капиллярностью явления могут оказывать на процесс испарения заметное явление [12].

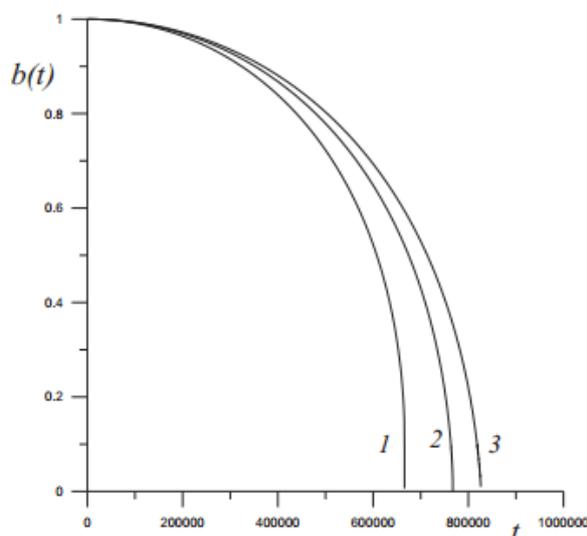


Рисунок 1.2 – Зависимость толщины жидкого слоя от времени: линия – $Ca = 0,2 \cdot 10^{-4}$, линия 2 – $Ca = 0,5 \cdot 10^{-4}$, линия 3 – $Ca = 0,1 \cdot 10^{-2}$ [12]

Кинетику испарения воды рассматривают в работе [13]. Исследовали гравиметрическим методом с помощью дериватографа Q-1500 D. Также для реализации различных надмолекулярных структур в жидкой воде использовались растворы хлоридов K, Na, Ba и Zn различной концентрации. Установлено, что скорости испарения чистой воды и растворов на её основе существенно различаются. Скорости установившегося процесса испарения ν одномолярных растворов при комнатной температуре образуют ряд $\nu_{KCl} > \nu_{NaCl} \geq \nu_{H_2O} > \nu_{BaCl_2} > \nu_{ZnCl_2}$. Зависимость скорости испарения от температуры одинакова для воды и растворов. Так же в статье показано, что скорость испарения ν представляет собой суперпозицию скоростей двух типов испаряемых частиц: молекул H_2O , слабо связанных с окружающей жидкостью и надмолекулярных образований (кластеров H_2O) на основе водородных связей.

Температура влияет на скорость испарения воды и растворов линейно. Это обусловлено, по-видимому, термическим разрушением надмолекулярных структур воды, образованных водородными связями [13].

Графическая зависимость весовых потерь P при испарении воды при различных температурах, $^{\circ}\text{C}$, полученная в вышеописанной статье, представлена на рисунке 1.3

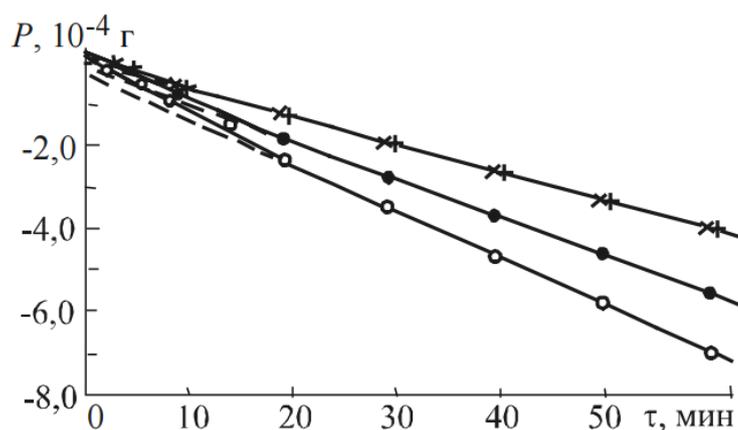


Рисунок 1.3 – Зависимость весовых потерь P при испарении воды при различных температурах, $^{\circ}\text{C}$ [13]

1.2 Методы определения толщины слоя жидкости

Для получения точных значений толщины используются различные методы, которые по способу реализации можно разделить на пять групп [3]:

1. Методы касания
2. Емкостные методы
3. Методы электропроводности
4. Радиационные методы
5. Оптические методы

1.2.1 Метод касания

Метод касания основан на непосредственном измерении толщины слоя жидкости с помощью зонда. Наконечник зонда устанавливается на поверхность подложки, задается нулевая отметка. Зонд перемещают к верхнему краю поверхности и устанавливают момент касания острия. И после этого определяют по шкале прибора толщину слоя жидкости.

Соприкосновения острия зонда с поверхностями пленки и подложки определяются с помощью электричества по паданию напряжения в цепи зонд – пленка – подложка или по изменению сопротивления во время соприкосновения. Основной недостаток связан с возмущениями, вносимыми в слой жидкости зондом, а так же со сложностью контроля измерений в обширной области течения слоя жидкости.

1.2.2 Электроемкостный метод

Основан на различии в диэлектрической проницаемости газа (пара) и исследуемой жидкости. Предположим, что слой жидкости толщиной дельта равномерно распределен по поверхности пластины плоского конденсатора, тогда емкость будет определяться из выражения

$$C = \frac{\epsilon_{жс} \epsilon_2 s}{\epsilon_2 \delta + \epsilon_{жс} \cdot (h - \delta)}, [3]$$

где s - площадь пластины конденсатора, h –расстояние между пластинами; $\epsilon_{жс}$ и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости жидкости и газа соответственно.

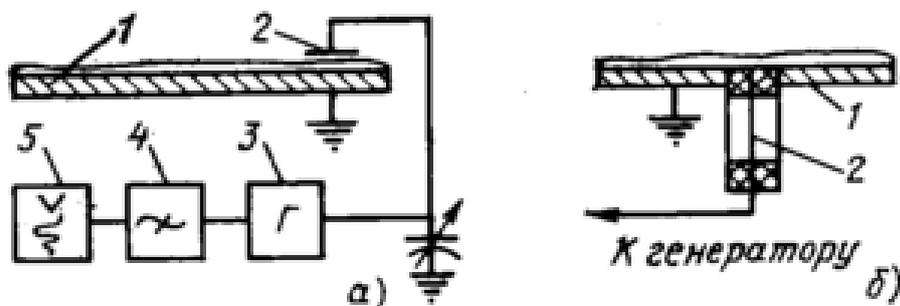


Рисунок 1.4 – электроемкостный датчик толщины пленки 1 – стенка канала, 2 - датчик, 3 – генератор высокой частоты, 4 – частотный детектор, 5 – потенциометр [3]

Как следует из уравнения, емкость или диэлектрическая проницаемость среды (жидкость + газ) однозначно характеризует величину δ . Схема измерений, построенная на этом принципе, показана на рисунке 1,а. Обкладками конденсатора являются орошаемая поверхность 1 и пластина 2.

Обычно площадь пластины не превышает 10 мм^2 . Электронная аппаратура, измеряющая емкость, состоит из генератора высокой частоты 3, частотного детектора 4 и электронного потенциометра 5. По измеренной величине C толщина пленки определяется из уравнения

$$\delta = \frac{C \varepsilon_{жс} h - s \varepsilon_{жс} \varepsilon_2}{C(\varepsilon_{жс} - \varepsilon_2)}, [3]$$

Емкостный датчик обладает высокой чувствительностью и не вносит возмущений в пленку жидкости. Некоторое возмущение потока при больших скоростях его движения может быть вызвано пластиной 2, которая помещается над пленкой. В таких случаях целесообразно применять конструкцию емкостного датчика, показанную на рисунке 1, б, которая не загромождает проходного сечения канала и не нарушает практически движения пленки. У такого датчика теоретическая зависимость емкости от толщины пленки имеет довольно сложный вид, однако ее легко получить путем тарировочных измерений.

Емкостным методом определяется средняя в пределах размеров датчика толщина пленки. При достаточно малых размерах датчика возможно измерение локальных значений δ . Разрешающая способность емкостного метода определения толщины пленки в интервале значений $\delta = 0 \div 15 \text{ мм}$ составляет 10^{-2} мм . Значительное влияние на показание емкостных датчиков оказывают температура потока и влажность газа (пара) над пленкой. Это влияние учитывается специальными поправками, определяемыми с помощью тарировочных опытов [3].

1.2.3 Метод электропроводности

Метод электропроводности основан на зависимости сопротивления пленки от ее толщины. Если на орошаемой поверхности разместить электроды, то при заданном напряжении сила тока в цепи будет зависеть от толщины жидкостного слоя над электродами. Этим методом определяется средняя на отрезке между электродами толщина жидкостной пленки. Обычно

расстояние между электродами не превышает 10δ при диаметре электродов $0,1 - 1$ мм. Наиболее подходящими материалами для электродов являются коррозионно-стойкие металлы с малым удельным сопротивлением (платина, серебро). Чувствительность метода и точность измерения толщины пленки повышаются с увеличением диаметра электродов. При большой толщине пленки вследствие нелинейной зависимости между электропроводностью и толщиной в показания приборов следует вносить поправки, устанавливаемые в тарировочных опытах. Это и является основным недостатком метода электропроводности [3].

1.2.4 Радиационный метод

Радиационный метод основан на взаимодействии радиоактивного излучения с пленкой жидкости. Чаще всего в качестве таких взаимодействий используют ослабление излучения и изменение коэффициента отражения.

При измерении толщины пленки, движущейся по внутренней поверхности трубопровода, сквозное просвечивание всего канала может быть рекомендовано только в том случае, если газовый поток не содержит влаги или содержание ее известно. Метод ослабления, когда источник излучения и детектор расположены по разные стороны канала, удобен тем, что не вносит возмущений ни в пленку жидкости, ни в газовый поток. Применение координатных устройств позволяет легко перемещать источник и детектор по трубопроводу и проводить измерения в любом сечении. Недостатком сквозного просвечивания является то, что с его помощью измеряется суммарная толщина пленки 2δ на стенках трубопровода и на показания прибора существенное влияние оказывает влажность газа [3].

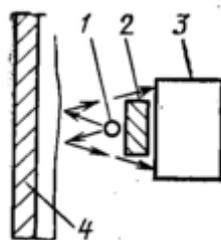


Рисунок 1.5 – измерение толщины пленки радиационным методом [3]

В тех случаях, когда газовый поток содержит влагу (дисперсно-кольцевой режим) или жидкая пленка движется по наружной поверхности стенки канала, источник и детектор располагают по разные стороны стенки. По этому принципу работают измерители толщины покрытий, выпускаемые промышленностью. Другой метод определения толщины пленки может быть реализован путем измерения интенсивности бета-излучения, прошедшего слой жидкости и отраженного от стенки. В этом случае источник излучения 1, экран 2 и приемник рассеянного излучения 3 помещаются по одну сторону стенки 4 со стороны контролируемого слоя жидкости. В промышленности этим методом определяют толщину слоев лака, краски, гальванических покрытий, а так же других веществ, нанесенных на поверхности металлов, используя серийные приборы типов ИТП, БТП, РТ-2, ГТ-1712, ТОР-1. При измерении тонких пленок толщиной 20-50 мкм погрешность не превышает 0,15 мкм [3].

1.2.5 Оптический метод

Оптический метод основан на взаимодействии поверхности жидкости с излучением измеряющего прибора. Один из способов реализации оптических методов – кино- и фотосъемка процесса с последующей расшифровкой зафиксированного на пленке результата. Например, толщину пленки можно определить по смещению интерференционных полос. К этой группе методов относится так же и определения толщины слоя жидкости с помощью конфокального оборудования.

Наиболее распространенным оптическим методом исследования поверхности твердых тел является эллипсометрия. На поверхность направляют линейно поляризованный свет определенной длины волны и определяют характер поляризации отраженного света в зависимости от длины волны падающего света. По показателю преломления и коэффициенту поглощения можно судить о химической природе поверхностного слоя

твердого тела и определить толщину слоя жидкости или прозрачного твердого материала.

Основным преимуществом оптических методов определения толщины слоя жидкости является возможность получения непрерывных значений пиков измерения без взаимодействия с исследуемой поверхностью, что позволяет минимально влиять на результаты полученных измерений. Так же стоит отметить малые габариты сенсоров датчиков, что позволяет установить оборудование датчиков на различные установки, где требуется компактность устройств. И, конечно же, интуитивно понятное программное обеспечение, с которым поставляется большинство современных датчиков. Оно позволяет получать спектр значений величин, необходимых для анализа протекающих процессов [3].

1.2.5.1 Оптический метод определения толщины слоя жидкости в конфокальном оборудовании

Конфокальный датчик является своеобразной эволюцией конфокального микроскопа, который работает на принципах конфокальной флуоресцентной микроскопии [14]. По сравнению с обычной флуоресцентной микроскопией, конфокальный микроскоп позволял проводить трехмерное субмикронное разрешение объекта и существенно расширил возможности неразрушающего анализа прочных образцов.

Особенность заключается в значительном контрасте, по сравнению с обычным микроскопом, что решается применением апертуры, расположенной в плоскости изображения и ограничивающей поток фонового рассеянного света.

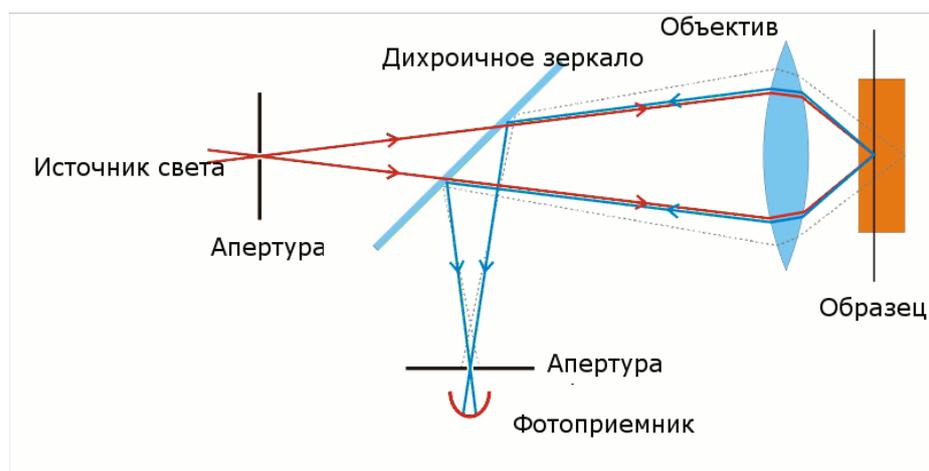


Рисунок 1.6 – схема конфокального микроскопа [14]

Рассеянный свет, идущий из глубины образца (пунктирные линии синего цвета), отсекаются апертурами, что обеспечивает высокий контраст изображения.

Принцип работы лазерного конфокального датчика

Понятие «конфокальный» означает «сфокусный»: в плоскости, оптически сопряженной с фокальной плоскостью объектива, располагается конфокальная диафрагма («pinhole»)[15]. Регистрируемое излучение фокусируется объективом на диафрагме, которая значительно ослабляет сигнал от участков, находящихся не в фокусе.

Лазерный луч фокусируется на измеряемую поверхность через линзы объектива, которые вибрируют вверх и вниз с высокой скоростью в вилке камертона.

Луч, отраженный от измеряемой поверхности, конвергируется на диафрагме и затем попадает на светочувствительный элемент.

Расстояние до объекта измеряется путем определения точного положения объектива в тот момент, когда максимальное количество света проникает на светочувствительный элемент.

Расстояние до объекта измеряется путем определения точного положения объектива в тот момент, когда максимальное количество света проникает на светочувствительный элемент. Точность измерения расстояния до объекта измерения не зависит от материала, цвета или угла падения

лазера. Что позволит применять датчик при самых нестандартных условиях расположения исследуемой подложки[14].



Рисунок 1.7 – общий вид внутренней компоновки конфокального датчика [14]

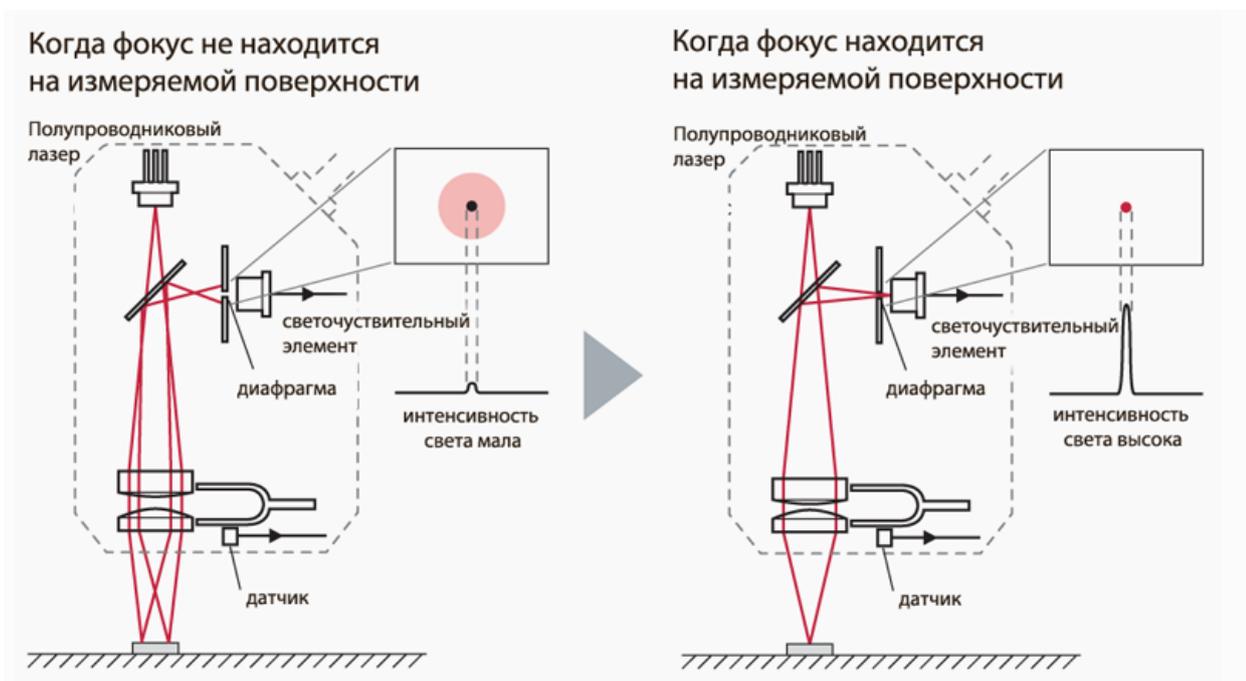


Рисунок 1.8 – центровка фокуса на исследуемой поверхности[14]

Преимущества оптического метода с использованием конфокального оборудования очевидны:

- из-за затенения шумов апертурой происходит получение точных и четких значений расстояния до поверхности;

- неразрушающий контроль – возможность бесконтактного измерения необходимой поверхности при получении значений в реальном времени;
- материал, угол наклона и отражающая способность поверхности не влияют на получение нужных измерений;
- относительная мобильность по сравнению с электроэмкостными методами определения толщины слоя жидкости.

К недостаткам можно отнести следующее:

- ограниченный предел измерений у различных типов сенсоров датчика, так же как и погрешность получаемых измерений;
- необходимость расположения исследуемой поверхности в фокусе датчика;
- необходимость установки (штука, которая получаемые значения выравнивает в линию) для получения плавных характеристик буферного поля.

Все эти особенности конфокального датчика и смежного оборудования позволяют эффективно и своевременно получать данные измерений, интересующие научные группы. Мобильность, быстрота извлечения данных, относительная точность и гибкость оборудования и программного обеспечения в совокупности дают приемлемые результаты измерений процессов тепломассопереноса.

1.3 Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия

В [16] обсуждается конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, посредством которой изучались поверхностные структуры пористого стекла. Были получены изображения поверхностей пористых стекол оптическим методом посредством конфокального сканирующего микроскопа (или конфокального датчика) и оптической микроскопии ближнего поля. Так же в статье приводятся результаты обработки изображений посредством метода медианной фильтрации и Фурье-преобразования.

Обсуждается целесообразность применения различных оптических методов в исследовании пористых структур, таких как:

1. Конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ, Laser scanning Confocal Microscopy - LSCM);
2. Сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ, Scanning Near-field Optical Microscopy – SNOM);
3. Атомно-силовая микроскопия (АСМ, Atom-Force Microscopy – AFM).

Все эти методы позволяют получить высокое пространственное разрешение исследуемого участка поверхности, но так или иначе оказывают воздействие на поверхность и структуры изучаемого образца. Разумеется, что вышеназванные методы могут использоваться и при измерении локальных характеристик поверхностных явлений жидкости.

Объектами исследования являлись образцы двухфазных (ДВ-1Ш, ОСТ 3-1899-81) и пористых стёкол (МІР и МАР) размерами 10x10 мм и толщиной 0.5 мм.

При исследованиях применялся конфокальный сканирующий микроскоп Leica TCS SL (Leica Microsystems GmbH, Германия) и зондовая нанолaborатория «Интегра Солярис» (ЗАО НТМ-ДТ, Россия).

Метод КЛСМ позволяет получить объемное изображение участка исследуемого объекта в отраженном и проходящем свете. Рельеф поверхности оказывает существенное влияние на получаемое изображение, а световой поток, падающий на поверхность и отраженный от неё, распределен в большом телесном угле.

Метод СБОМ основан на сканировании поверхности образца источником оптического излучения с размерами, меньшими, чем длины волн зондирующего излучения, на близком расстоянии от поверхности (в «ближнем поле»). Особенностью СБОМ является необходимость удержания зонда вблизи поверхности при регистрации интенсивности светового поля, для этого используется атомно-силовой принцип удержания зонда вблизи

поверхности – метод поперечно силовых (shear force) взаимодействий. Этот метод и реализован в «Интегра Солярис».

Так же в статье отмечено, что в методах КЛСМ и СБОМ формируется достаточно высокая плотность мощности излучения на поверхности образца, что может оказывать влияние на результаты измерений, особенно если поверхность обладает чувствительностью к электромагнитному излучению (нагрев поверхности, модификация поверхности, фотохимические процессы). Это необходимо учитывать при проведении экспериментов на установках кипящего слоя жидкости или двухфазном течении жидкости и газа.

В качестве экспериментальных результатов были получены изображения поверхности стекла ДВ-1Ш, полученные при различных длинах волн зондирующего излучения, где была объявлено влияние достигаемого аксиального разрешения микроскопа.

Также указано, что на получаемые изображения поверхностей в значительной степени влияют различные факторы, такие как: шумы аппаратуры, внешние вибрации и сотрясения, изменения температуры в процессе измерений, аппаратурные особенности измерительного прибора и т.д.

Для устранения шумов (входных усилителей, акустические шумы и внешние вибрации) и другие особенности аппаратуры, приводят к необходимости фильтрации получаемых изображений. Для этого используется метод медианной фильтрации. Сказано и о том, что самым мощным инструментом коррекции изображений является спектральная фильтрация на основе преобразований Фурье.

Анализ полученных изображений подтверждает, что качественное изображение должно соответствовать гистограмме, плавно распределенной по всему диапазону яркости и плавно спадающей до нулевых значений на краях диапазона. Однако получение качественного исходного изображения в микроскопии высокого разрешения является достаточно сложной задачей.

Изображения образцов ПС ДВ-1Ш, МІР и МАР, полученные методами КЛСМ и СБОМ с разных участков поверхности – 15x15, 8x8, 5x5 мкм, свидетельствуют о наличии структур на поверхности с разными оптическими свойствами. Оптические изображения СБОМ более четкие и детальнее, чем в случае КЛСМ, размеры крупных рассеивающих (отражающих) и поглощающих структур на изображениях совпадают. При первичной обработке изображений пористых стекол наиболее эффективными являются: сглаживающие фильтры, медианные фильтры и метод фурье-преобразования.

Для получения воспроизводимых оценок поверхностных структур необходимо выбрать качественное изображение. Оценка качества изображения может быть проведена на основе анализа гистограммы яркости, качественному изображению должна соответствовать гистограмма, плавно распределенная по всему диапазону яркости и плавно спадающая до нулевых значений на краях диапазона.

Табл.1.1 Оценки шероховатости поверхности образцов стекол при использовании некоторых процедур обработки изображений [16]

Образец*	Процедура	Средняя высота, нм	Sz, нм	Sa, нм
ДВ-1Ш	Исходное изображение	4,68	4,38	0,59
	Медианный фильтр	4,11	3,45	0,49
	Фильтр Фурье	2,78	2,29	0,46
МІР	Исходное изображение	3,15	3,24	0,49
	Медианный фильтр	3,15	3,03	0,40
	Фильтр Фурье	1,71	2,03	0,33
МАР	Исходное изображение	3,69	3,06	0,39
	Медианный фильтр	3,24	2,55	0,33
	Фильтр Фурье	1,98	1,58	0,27

Примечание. *Изображения получены в режиме ПСМ;

Sz – шероховатость поверхности по пяти максимальным высотам и впадинам;

R_a – средняя арифметическая шероховатость.

Один из ключевых моментов современного материаловедения – получение подробной информации о структуре поверхности [20]. Для производственного контроля уже недостаточно двумерной профилометрии на основе параметров шероховатости – требуется комплексное трехмерное описание топографии, включающее нестатические характеристики. В этой связи конфокальная микроскопия (КМ) имеет большие преимущества при бесконтактном и оперативном получении таких характеристик. Именно этот способ обеспечивает описание структур исследуемых поверхностей.

В статье раскрываются следующие вопросы:

- Общее представление о трехмерной КМ;
- Демонстрация достигаемого уровня разрешения и точности системы;
- Основные области применения КМ.

Рассматриваются физические основы оптической конфокальной микроскопии и применение принципа NanoFocus. Достигаемое разрешение и точность измерений продемонстрированы на примере сравнения результатов исследования стандарта глубины и металлической подложки с применением контактного профилометра. Так же указано применение метода для описания характеристик поверхностей в промышленности (контроль качества поверхности листового материала).

Отмечено, что разрешающая способность конфокального датчика достаточна для измерения горизонтальных структур с разрешением менее 1 мкм. Что позволяет получить трехмерное изображение образца с разрешением по вертикали всего в несколько нанометров. Ярким примером возможностей нанометрового разрешения конфокального датчика является измерение топографии поверхности подложки, отшлифованной с обратной стороны. Результаты механического шлифования можно проанализировать на уровне нанометров ($R_a=5\text{нм}$).

Сравнения результатов, получаемых с помощью конфокального датчика и с помощью контактного профилометра, показало максимальную взаимную корреляцию 99,0% по сравнению с контактным измерением.

В [15] рассматривается диагностика состояния деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) посредством конфокального лазерного сканирующего микроскопа. С его помощью можно построить 3D-модель рельефа поверхности исследуемого материала в широком диапазоне увеличений. Конфокальный микроскоп (датчик) позволяет получать полностью сфокусированное изображение объемных объектов с реалистичной цветопередачей при большом увеличении с высоким разрешением, недостижимым с помощью оптических микроскопов.

Объект исследования – поверхности агрегатов двигателя АЛ-31Ф после пяти лет натурной экспозиции в условиях мягкого морского климата на открытой площадке Геленджикского центра климатических испытаний ФГУП «ВИАМ» им. Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ).

Исследовали корпус маслососа из сплава АК7ч., обоймы из стали типа 30Х3МФ и втулки из бронзы БрАЖН-10.

Пораженные поверхности исследовали с помощью конфокального оборудования Olympus Lext OLS3100. Так же получены 3D-модели рельефа поверхности с коррозионными поражениями, с помощью статистической обработки данных шероховатости с использованием стандартного программного обеспечения для КЛСМ Olympus Lext OLS3100.

Так же определили шероховатость в соответствии с ГОСТ 2789-73 и ISO 4287:1997/ISO 1302:2002, определяя параметр шероховатости как среднее арифметическое отклонение профиля.

Целью работы являлась оценка влияния климатических факторов в условиях ГЦКИ ВИАМ на коррозионные повреждения различных материалов в составе корпуса маслососа двигателя АЛ-31Ф. Измерения проводились при различных увеличениях, измерена шероховатость

поверхности деталей вблизи выраженных коррозионных повреждений и толщина соляных отложений.

Табл.1.2 Шероховатость поверхностей деталей по ГОСТ 2789-73[15]

Материал	Условный номер зоны	Увеличение	Площадь кадра, на которой измеряли шероховатость, мм ²	Шероховатость R, мкм
Сталь типа 30Х3МФ	1	x100	1,3	6,94
	2	x200	0,31	10,77
Сплав АК7ч. Бронза БрАЖН-10	3	x50	0,5	8,6
	4	x500	0,05	0,62
	5	x500	0,05	0,5

В связи с чем, был сделан вывод, что результаты измерения шероховатости зависят от места измерения и площади, на которой её измеряли. Чем больше поверхность кадра, тем больше вероятности попадания в кадр объектов большой глубины или высоты, поэтому при малых увеличениях шероховатость, как правило, имеет большие значения, чем при больших увеличениях.

В заключении статьи были указаны возможности метода КЛСМ, такие как:

- проведение комплексного исследования коррозионных повреждений широкого спектра конструкционных материалов с помощью данных о глубине питтинговой коррозии, величине локальной и интегральной шероховатости пораженных поверхностей;
- получение 3D-моделей поврежденных поверхностей с распределением цветовой гаммы продуктов коррозии, видимой в оптическом диапазоне света.

В [17] представлены экспериментальные исследования профиля поверхности тонкого горизонтального слоя жидкости. Деформацию поверхности вызывает эффект термокапиллярной конвекции за счет

точечного нагрева жидкости. Измерение локальной толщины слоя проводилось с помощью фотоабсорбции. Были так же получены профили поверхностей для слоя раствора бриллиантового зеленого в н-бутаноле в различные моменты времени с начала нагрева.

Основная проблема применения фотоабсорбции для определения профиля поверхности тонкого слоя жидкости – необходимость длительной обработки полученных фотографий и склейка их в видео. Так же невозможность наблюдения в реальном времени за изменением локальных характеристик тонкого слоя жидкости, что явно уступает по сравнению с методом конфокальной сканирующей микроскопии.

К преимуществам фотоабсорбции можно отнести возможность получения 3-D изображений процесса, когда как конфокальный датчик не предусматривает эту функцию, хотя в ряде КЛСМ присутствует и эта функция.

Опыты, связанные с термокапиллярной конвекцией, чувствительны ко многим внешним факторам, что ограничивает круг методов фиксации локальных характеристик жидкости (например, касательный метод). КЛСМ - неконтактный оптический способ измерения, что определенно позволяет его использовать в этом опыте. Но с небольшим условием – энергия пучка света, падающего на измеряемую поверхность, не должна влиять на получаемые результаты.

В заключении были получен профиль деформации поверхности жидкости спустя 8 секунд после начала нагрева и восстановленные профили деформации поверхности жидкости в моменты времени 1,2,4,6,8,10,15 и 30 секунд после начала нагрева.

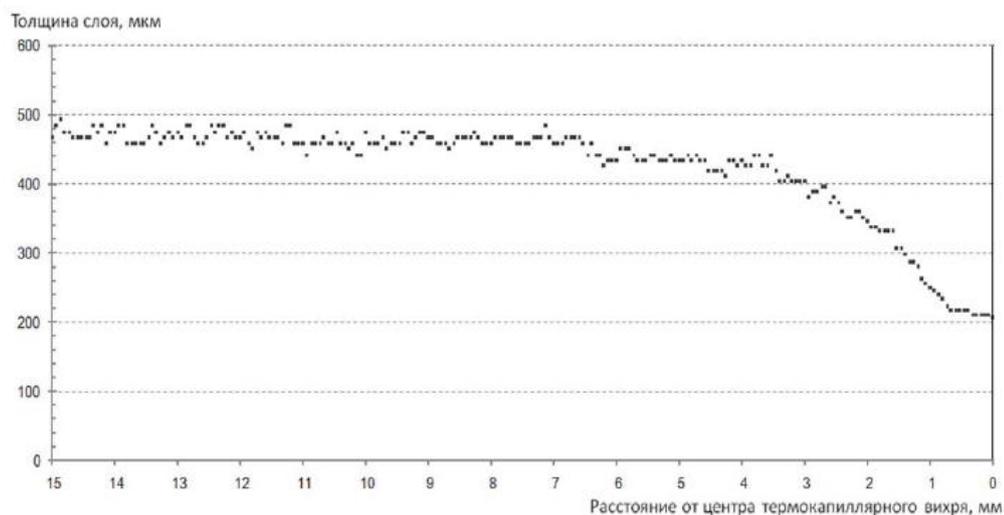


Рисунок 1.9 – точки, соответствующие профилю деформации поверхности жидкости спустя 8 сек. после начала нагрева [17]

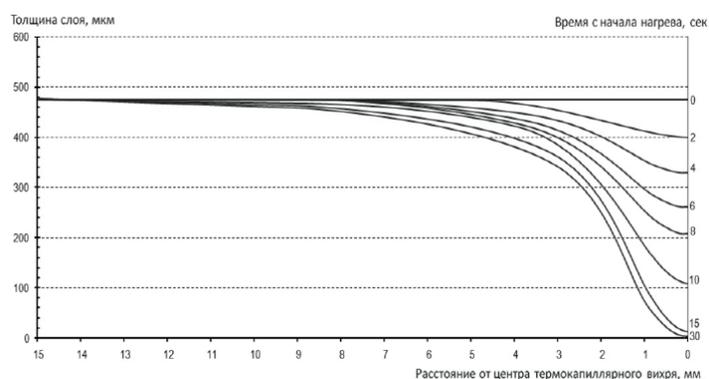


Рисунок 1.10 – восстановленные профили деформации поверхности жидкости [17]

В [18] в качестве оборудования использовался лазерный сканирующий микроскоп Olympus OLS LEXT 400. Методика заключалась в том, что образец катализатора закреплялся на покровном стекле и помещался на предметный столик микроскопа: далее выбиралась исследуемая область поверхности и необходимое увеличение, настраивалась фокусировка и выполнялась съемка.

Были исследованы образцы алюмооксидных катализаторов газофазной дегидратации 1-фенилэтанола, АОК 63-22К, медный катализатор низкотемпературной конверсии оксида углерода НТК-11, катализатор

селективного гидрирования ацетиленовых углеводородов в составе этан-этиленовой фракции G-58E.

Судя по полученным результатам, метод позволяет исследовать поверхности с 420х увеличением, получая четкие изображения с высокой точностью позиционирования.

В заключении отмечено, что конфокальная оптическая микроскопия может быть использована в качестве метода исследования поверхности катализатора для определения характера распределения активного компонента по объему, а так же для качественного определения окрашенных примесей, в частности, оксидов железа (при съёмке с высоким разрешением и в цветном режиме).

В [19] рассматривается автоматизация процесса обработки данных лазерной сканирующей конфокальной микроскопии с помощью системы компьютерной объемной визуализации, основанной на двух методах – трассировки лучей и визуализации слоями. Методы отличаются друг от друга качеством получаемого изображения, требованием к вычислительным ресурсам и скоростью работы и применяются в зависимости от того, какие сведения необходимо извлечь из полученных данных.

Объемная визуализация позволяет представить массив значений, приходящий с микроскопа, в наиболее информативной для исследователя форме. Объемная визуализация позволяет отобразить не только внешний вид объекта, но и его внутреннее строение, что крайне важно для данного метода исследования.

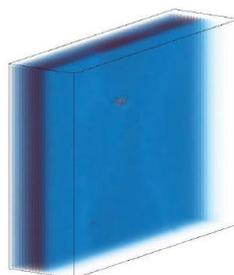


Рисунок 1.11 – объемное изображение, полученное методом визуализации слоями [19]

Данный метод, как видно из рисунка, позволяет отобразить объем в удобной для работы форме, однако он обладает низкой детализацией, что затрудняет чтение рельефа поверхности, когда это необходимо.

Следует отметить, что метод визуализации слоями хорошо подходит для аппаратуры, не поддерживающей программируемый графический конвейер.

Для улучшения визуализации деталей в объеме применим метод трассировки лучей.

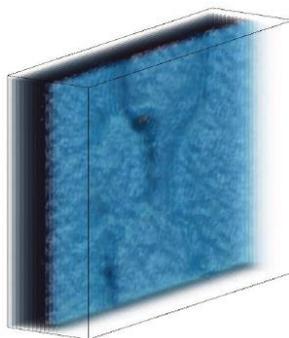


Рисунок 1.12 – объемное изображение, полученное методом трассировки лучей[20]

Следует отметить, что метод трассировки лучей очень требователен к вычислительным ресурсам, поэтому применять его можно лишь на современных видеокартах. Данный метод целесообразно использовать при необходимости четкой визуализации рельефа поверхности внутри объема.

Данные методы хорошо применимы для анализа внутренней структуры тонких слоев жидкости и других прозрачных материалов, что позволит более детально изучать интересующие области. Но большинство КЛСМ уже оборудованы программным обеспечением, которое позволяет анализировать исследуемые области материалов без дополнительных методов обработки получаемых значений.

В [21] описаны типичные примеры экспериментов по визуализации динамики испарения, охлаждения, кристаллизации, растекания и перемешивания капель различных прозрачных жидкостей на горизонтальной

стеклянной подложке с помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения широкого коллимированного лазерного пучка.

Этот метод позволяет увидеть динамику процессов, протекающих в пограничном слое капли, если при этом происходит изменение показателя преломления жидкости, например, вследствие изменения температуры, концентрации или других физических параметров. Так же приведены результаты полученных интерференционных изображений, показывающих динамику изменения формы поверхности капель при испарении.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) широкого коллимированного лазерного пучка, позволяет не только увидеть процессы, невидимые невооруженным глазом, но и получать значения физических величин, изменяющихся в течение этих процессов. Гидро- и теплофизические процессы развиваются в тонком пограничном слое меньше миллиметра, что осложняет использование контактных методов исследования конвекции и других процессов, развивающихся в таком слое.

Соответственно, для расчетов характеристик этого слоя необходимо учитывать изменение физических свойств жидкости в нём. Это указывает на необходимость использования оптических методов исследования динамики процессов, протекающих в слое жидкости.

В настоящее время широко используются методы исследования потоков, основанные на регистрации лазерного излучения, рассеянного находящимися в потоке частицами. Это дало возможность визуализировать общую картину течения и измерять скорость потока по эффекту Доплера, а также наблюдать влияние оптически неоднородного потока на характер распространения в нем лазерного пучка. Также был предложен лазерный рефрактографический метод (ЛАРЕФ-метод) исследования оптически неоднородных потоков с использованием лазерных пучков специальной формы, при этом регистрация рефракционных картин ведется с помощью специализированных цифровых видеокамер с последующей компьютерной обработкой.

В результате проведения экспериментов были получены рефлектографические изображения капли воды при угле падения пучка, близком к критическому углу ПВО и при НПВО. Так же при определенных условиях из-за источника когерентного излучения – лазера, на изображениях появляется система интерференционных колец. Так же были получены изображения испарения сахарного раствора в процессе испарения, динамика процесса кристаллизации соли из водного раствора при высыхании капли, картины визуализации кристаллизирующейся капли воды для разных углов падения пучка на границу раздела, распространение фронта кристаллизации в тонкой пленке воды, изображение капли дистиллированной воды, полученные при ее охлаждении с помощью оптического микроскопа и видеокамеры.

Метод позволил исследовать процессы в прозрачных жидкостях, которые невозможно увидеть прямым наблюдением. Так же можно заглянуть в тонкий пограничный слой жидкости толщиной в несколько сотен нанометров, что недоступно для других методов.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

После анализа научных публикаций по следующим тематикам: оптический метод измерения толщины слоя жидкости, конфокальная лазерная сенсорная микроскопия, испарение слоя жидкости, сделаны краткие выводы, которые составлены в таблице 1.1, где приведена информация о каждой работе.

Таблица 1.3 – Публикации по темам испарение жидкости, измерение толщины слоя жидкости, КЛСМ

Автор	Изучено/разработано	Примечание
Хашченко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И.	Температурная зависимость скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твёрдой поверхности нагрева	Получены теоретические зависимости, которые позволяют получить значения скорости испарения жидкости
Поникаров А.С., Осипова Л.Э., Теляков Э.Ш., Поникарова И.Н.	Массоотдача в системах газ-жидкость при испарении и конденсации	Получена модифицированная структура уравнения массоотдачи
Рева С.Л., Рева Л.С., Голованчиков А.Б.	Разработана экспериментальная установка для исследования процессов капельного испарения	Возможность применить установку для исследований процессов при неподвижной плёнке жидкости
Актершев С.П., Алексеенко С.В.	Волновое течение испаряющейся плёнки жидкости, эволюция возбужденных волн в испаряющейся пленке в	На поверхности испаряющейся пленки развиваются естественные волны, обусловленные

	широком частотном диапазоне	неустойчивостью течения, амплитуда развитых волн падает с увеличением расстояния
Гончарова О.Н., Резанова Е.В., Масенюк Л.А.	Численно исследовано течение тонкого слоя жидкости с учетом испарения	Представлен численный алгоритм определения положения термокапиллярной границы тонкого слоя жидкости
Кузнецов В.В.	Условия переноса тепла и массы на границе раздела жидкость-газ при диффузионном испарении	Связанные с капиллярностью явления могут оказывать на процесс испарения заметное явление
Ермолаева А.И., Новиков С.Н.	Кинетика процесса испарения водных растворов	Температура влияет на скорость испарения воды и растворов линейно
Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А.	Применение КЛСМ для материаловедения	Получены данные о глубине коррозии, локальные и интегральные шероховатости, получены 3D-модели поврежденных поверхностей
Евстрапов А.А., Есикова Н.А., Клоков М.В., Кухтевич И.В.,	Поверхностные структуры пористого стекла, обработка изображений посредством метода медианной	Получены изображения поверхностей пористых стёкол, результаты обработки изображений,

Антропова Т.В.	фльтрации и Фурье-преобразования	оценка шероховатости стёкол
Флягин В.М.	Исследование профиля поверхности тонкого горизонтального слоя жидкости	Получен профиль деформации поверхности жидкости
Васильев В.А., Мифтахов И.С., А.В. Опаркин, Каралин Э.А.	Исследование образца различных катализаторов методом КЛСМ	Подтверждена пригодность метода КЛСМ для получения качественных изображений катализатора
Земсков И.И.	Автоматизация обработки данных лазерной сканирующей конфокальной микроскопии	Методы трассировки лучей и визуализация слоями

По тематике испарения слоёв жидкости можно указать, что дополнительные исследования в области не движущихся плёнок жидкости могут внести коррективы в научные работы [10], [11]. Так же в работе [9] для фиксации значения толщины капли и изображения использовалась скоростная видеокамера, когда её можно заменить более дешевым конфокальным сканирующим микроскопом, который позволит получать объёмные изображения высокого качества.

Наиболее распространено применение метода КЛСМ в биологии, а именно в цитологии, медицине, при диагностике поверхности сетчатки глаза, где конфокальный микроскоп позволял получать четкие изображения в нужном видимом спектре. В технике КЛСМ применяется, в первую очередь, для металлографии поверхностей, показывая объёмные и цветные изображения дефектов поверхностей. В теплофизике – при изучении

процессов, проходящих в прозрачных жидкостях и материалах, так же конфокальный датчик позволяет получать значения расстояния с отражающих поверхностей, что обычный датчик не позволяет сделать.

Большая проблема заключается в недостатке отечественных работ по процессам испарения с датчиком КЛСМ, который позволяет получать точные и своевременные значения локальных характеристик слоя жидкости с высокой частотой. Бесконтактный метод измерения интересующих параметров в совокупности с высокой точностью – то, что необходимо научным группам для выполнения поставленных экспериментов по испарению слоёв жидкости.

В связи с вышесказанным, можно заявить, что применение конфокального датчика в исследовании кипения и испарения тонких слоёв жидкости с поверхности твёрдого тела, находящиеся в состоянии покоя – задача более чем актуальная, решению которой посвящена данная работа.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДОЙ ПОДЛОЖКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНФОКАЛЬНОГО ДАТЧИКА

2.1 Планирование экспериментальных исследований

2.1.1 Выбор схемы проведения экспериментальных исследований

Исследования можно представить как активные и пассивные [22],. Так как в данной работе значения факторов задавались, то экспериментальные исследования были активными.

Есть два вида планирования эксперимента: последовательное и рандомизированное [23].

Была выбрана последовательная схема планирования эксперимента. На каждом этапе эксперимента исследователь принимал решение об окончании наблюдений – в этом случае принимается решение об изучаемом параметре распределения измерений основываясь на проведенных экспериментах. При решении продолжать эксперимент выбирается управление для последующего измерения в зависимости от результатов, полученных в предыдущих экспериментах (начало проведения следующего эксперимента). Это длится до окончания наблюдений.

Последовательный план изменения факторов вызывает непрерывное изменение факторов в порядке возрастания или убывания.

Рандомизированное планирование значит, что выбор значения независимой переменной происходит случайно, по неопределенному правилу. Такой вид планирования подходит для исследований, имеющих широкий диапазон независимой переменной, когда при проведении эксперимента невозможно охватить всю область значений. Такой вид планирования позволит значительно сократить время проведения серии экспериментов.

Тип плана зависит от вида проводимого эксперимента – воспроизводимый либо невоспроизводимый [23]. Данное исследование является невоспроизводимым, по причине того, что процесс испарения плёнки жидкости протекает во времени без возможности повторения.

В связи с вышесказанным принята последовательная схема планирования серии экспериментов. При такой схеме выбирается момент остановки N наблюдений в зависимости от результатов измерений, для удобства измерения и проведения эксперимента, так как исследования являются невоспроизводимыми.

2.1.2 Основные размерные параметры воздействия

Варьирование теплового потока, которое задается источником питания, находится в пределах максимально возможной мощности пьезоэлемента и необходимостью установки наиболее высокой скорости испарения слоя жидкости, находящейся на твердой поверхности подложки.

Изменение толщины слоя жидкости ограничивается двумя факторами: минимальная толщина слоя жидкости, которую способен зафиксировать конфокальный датчик (в пределах 0,5мм), а второй фактор – высота стенки рабочего участка (5мм).

Материал выбирается из тех, что широко используются в тепломассообменных аппаратах, со значительными отличиями в свойствах. Соответственно, будет учитываться влияние свойств материалов на процесс теплопередачи.

Интенсивность теплоотдачи требует выбора определенных материалов и шероховатости поверхности из ряда широко используемых материалов. Информация по основным факторам, участвующих в эксперименте, указаны в таблице 2.3.

Таблица 2.1 – Основные факторы воздействия

Фактор	Значение факторов
Жидкость	Дистиллированная вода

Толщина слоя жидкости, мм	1; 1,5; 2; 2,5; 3
Температура подложки, °С	80, 90, 100
Материал подложки	Нержавеющая сталь

Выходными параметрами в эксперименте будут следующие величины:

- а. Массовая скорость испарения;
- б. Коэффициент теплоотдачи с поверхности жидкости;
- с. Температура слоя жидкости;

В качестве рабочего тела использовалась дистиллированная вода, ГОСТ 6709-72.

2.2 Описание экспериментальной установки

При исследовании процесса испарения тонкого слоя жидкости использовались два способа измерения тонкого слоя жидкости: с применением оборудования линейного актуатора с щупом и конфокального датчика. На рисунках 2.1 и 2.2. представлены принципиальные схемы и фотографии установок.

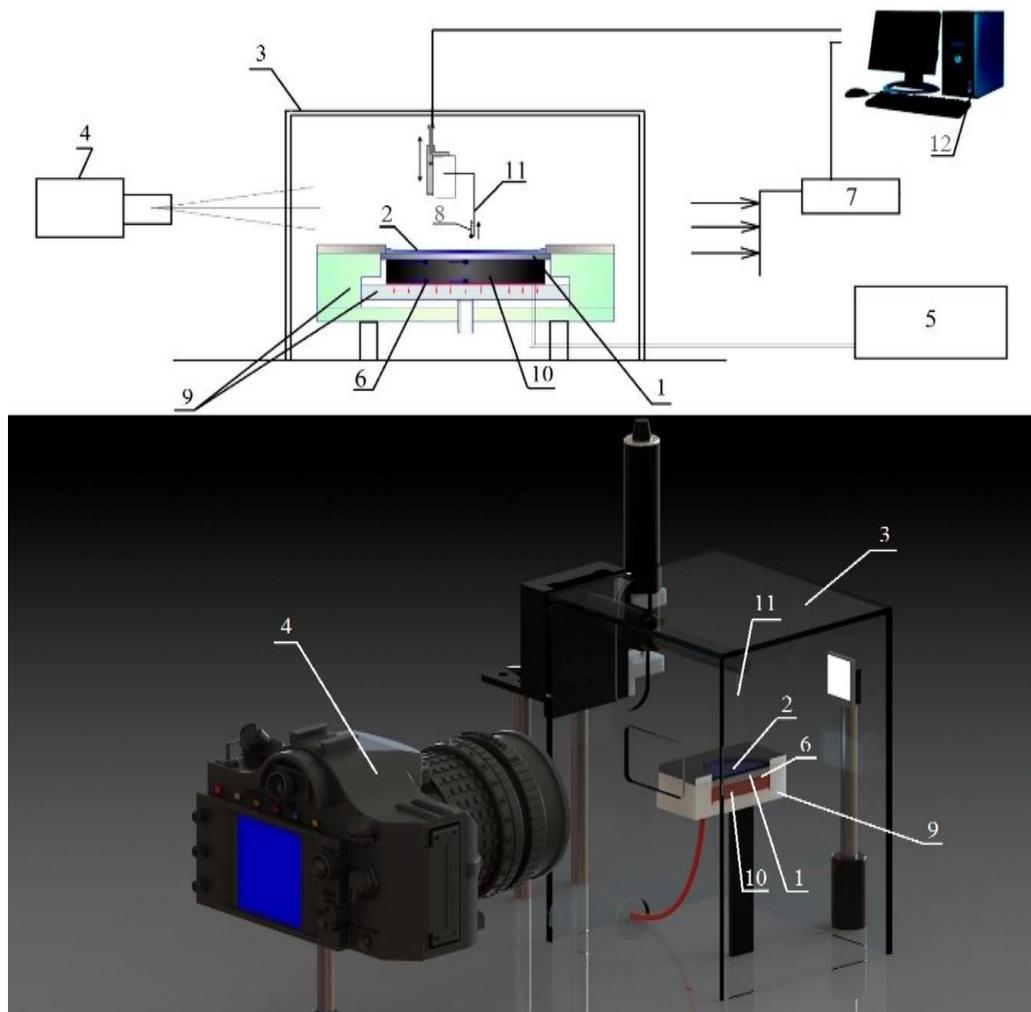
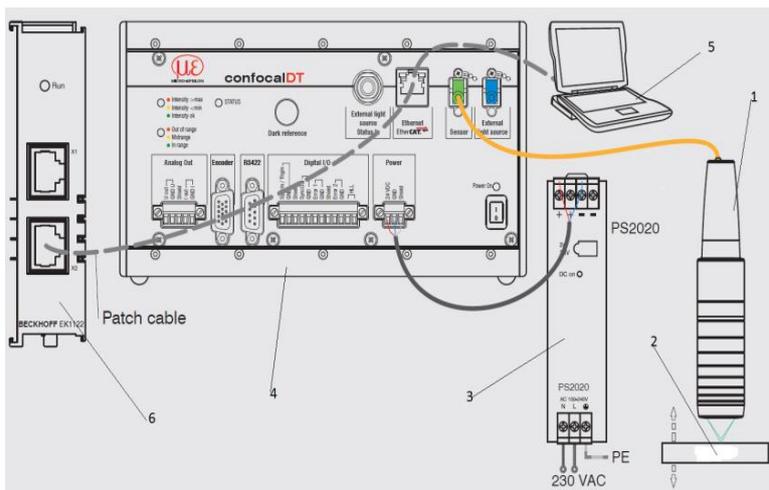
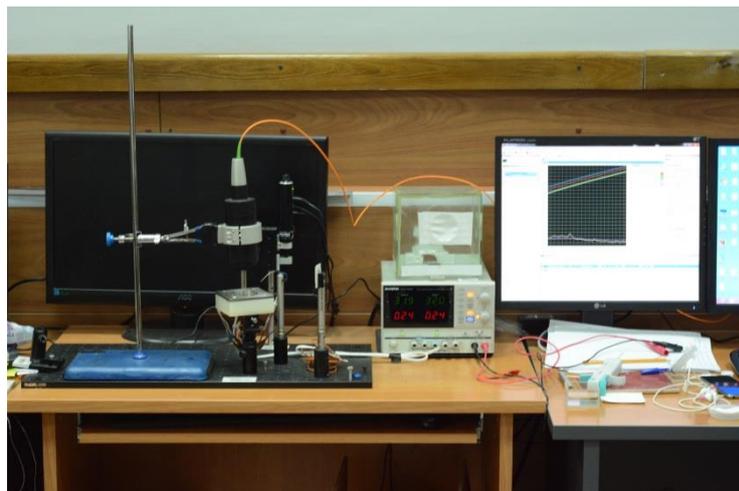


Рисунок 2.1. – Схема экспериментальной установки при использовании линейного актуатора с щупом

1 – подложка, 2 – жидкость, 3 – стеклянный бокс, 4 – фотокамера, 5 – источник питания, 6 и 8 – термопары, 7 – контроллер аналого-цифровой



(а)



(б)

Рисунок 2.2. – Принципиальная схема (а) и фотография установки с конфокальным датчиком (б): 1 – сенсор; 2 – поверхность нагрева; 3 – источник питания; 4 – контроллер; 5 – ЭВМ.

На рисунке 2.3 схематично изображен рабочий участок установки. Стоит из следующих элементов:

1. Подложка;
2. Медная пластина;
3. Нагревательный элемент;
4. Ограждающий бокс.

В середине рабочего участка находится углубление цилиндрической формы диаметром 50мм и глубиной 5мм. Внизу находится подложка, по бокам корпус рабочего участка. Под подложкой 1 находится медная пластина, в которой находится пьезоэлемент 3 (MINCO 275 Ом). В это углубление поочередно вставлялись плоский нагревательный элемент 3, медная пластина 2 и подложка 1. Для установки термопар 2 в медной пластине 2 имеются два прямых паза, проходящие через центр.

Гониометр (THORLABS GN05/M) позволяет корректировать наклон рабочего участка относительно горизонтальной линии.

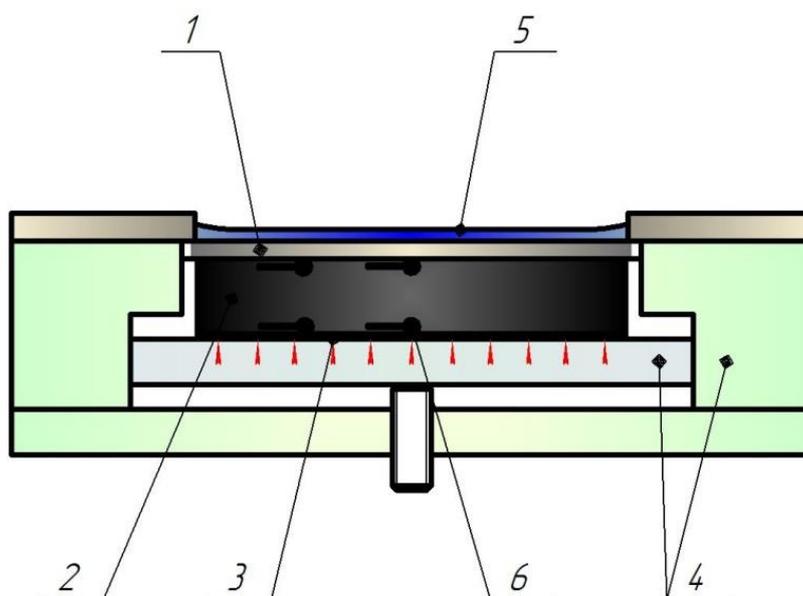


Рисунок 2.3 – Рабочий участок установки,

1 – медная пластина; 2- термопары; 3 – пьезоэлемент; 4 - подложка 5 – стенка корпуса; 6 – исследуемый слой жидкости

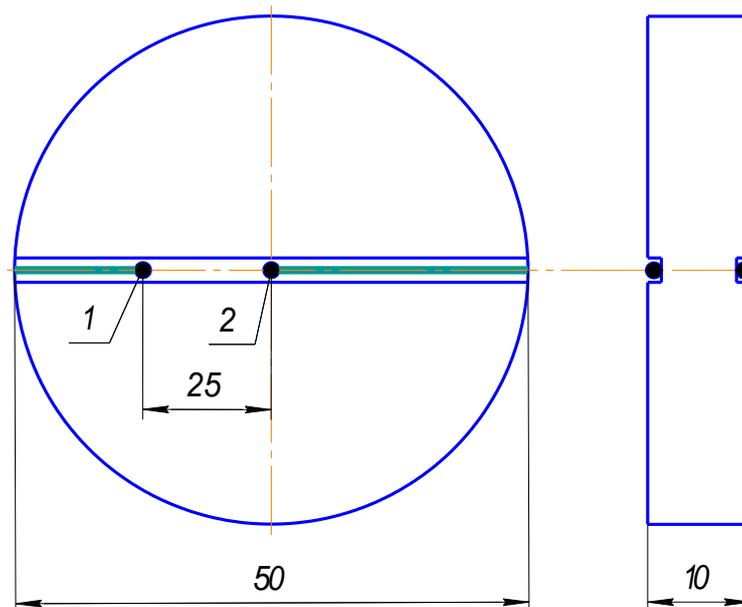


Рисунок 2.4 – Металлическая пластина с установленными термопарами
1,2 - термопары

Пьезоэлемент используется для нагрева подложки до нужной температуры путём пропускания через проводник электрического тока. Применяется термоэлектрический преобразователь типа MINCO 275 Ом.

Пьезоэлемент с помощью проводов подключен к источнику питания постоянного тока INSTEK GPD-73303D. Этот источник питания тока

позволяет точно установить параметры электрического тока, обеспечивает высокую стабильность подаваемого тока и невысокий уровень пульсаций напряжения и тока. Источник питания позволяет устанавливать значения напряжения в пределах до 32В, силу тока – до 3,2 А.

Значения температур, получаемых с поверхности подложки, получались с помощью устройства National Instruments. Для регистрации значений температур в различных точках рабочего участка использовались 5 термопар «хромель-капель». Термопара выполнена из медно-никелевого термоэлектродного сплава марки МНМц43-0,5 и никелевого термоэлектродного сплава марки НХ 9,5. Термопары калибровались с точностью 0,1°С. Данные термопары представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики ХК-термопары

Термопара	Марка сплава	Ni,%	е,%	и,%	г,%	и,%	п,%	о,%	Диаметр, мм
"Хромель-капель"	МНМц 43 – 0,5	4		4					0,2
	НХ 9,5	9					,7	,5	

При работе контроллер передает ЭВМ текущие значения температур с термопар, когда как контроллер конфокального датчика передает данные на совместимый компьютер по интерфейсу IF2008 с помощью Ethernet-кабеля. Температуры отображаются на окне Data View программного обеспечения LabView SignalExpress 2012, а глубина слоя жидкости на буферном окне программного обеспечения IFD2451 Tool V3.1.2. На рисунках 2.4 и 2.5 представлены зависимости температур, регистрируемой термопарами в различных точках рабочего участка, от времени, и толщины слоя жидкости, регистрируемого конфокальным датчиком, от времени.

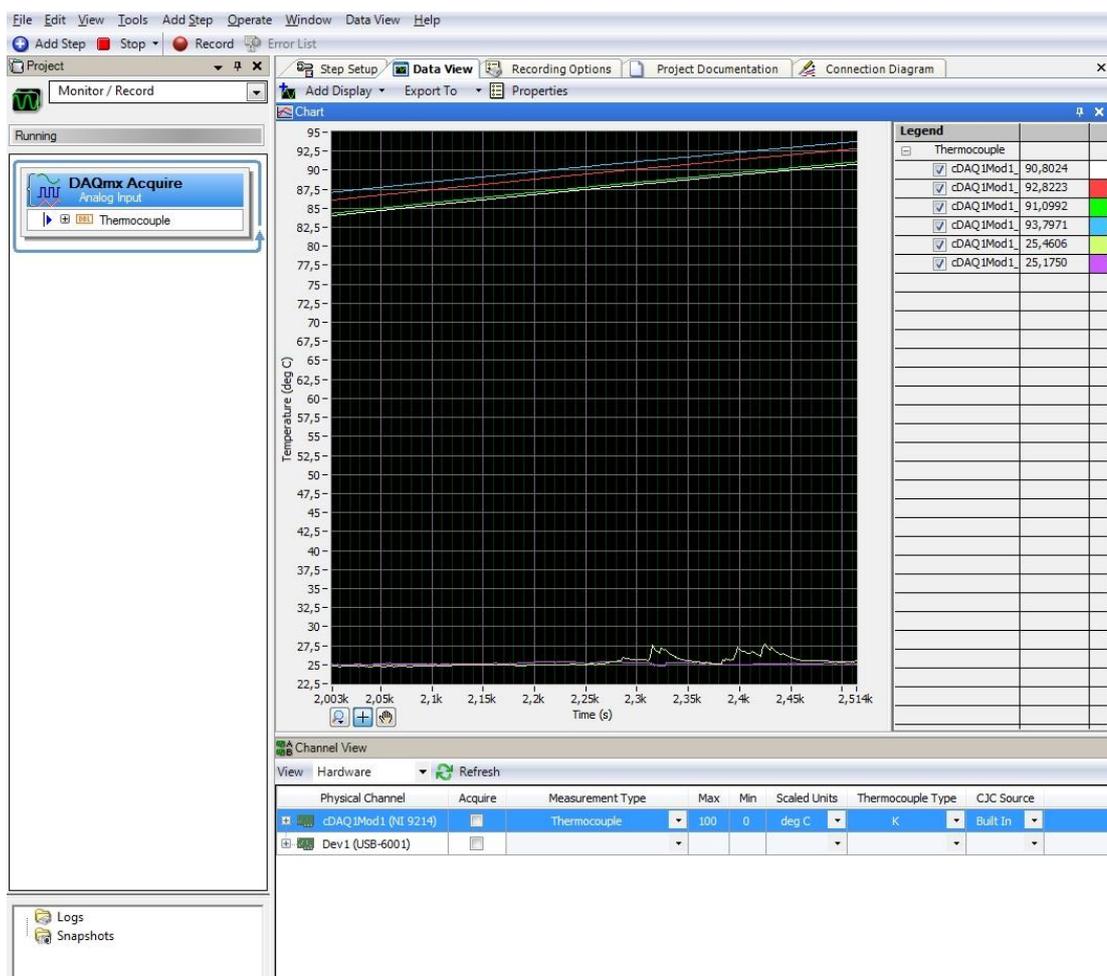


Рисунок 2.5 - Изменение температуры в точках расположения 1,2,3,4,5

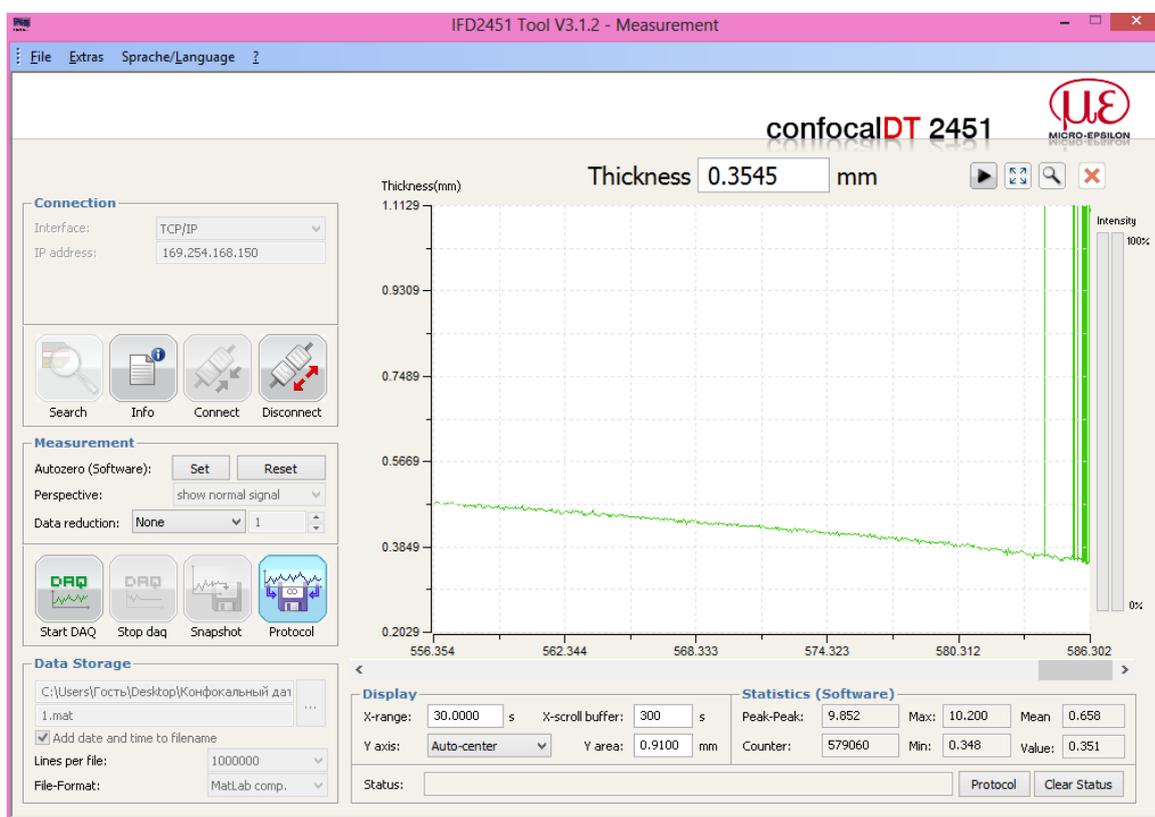


Рисунок 2.6 – Изменение толщины слоя жидкости в центре подложки[3]

Конфокальное оборудование состоит из следующих основных узлов:

1. Сенсор датчика IFC2451
2. Контроллер confocalDT 2451
3. Ethernet-кабель
4. ЭВМ с установленным программным обеспечением IFD2451 Tool

V3.1.2

5. Источник питания MCH-305D-II

2.3 Описание методики

2.3.1 Методика проведения эксперимента по измерению толщины слоя жидкости и температур рабочего участка в процессе испарения и кипения (при замене линейного актуатора с щупом на конфокальный датчик)

Пьезоэлемент нагревает металлическую пластину, на которой установлена подложка. При достижении заданной температуры на нижней поверхности, шприцем наносится слой жидкости. После того, как жидкость помещена на подложку, запускается сканирование толщины слоя жидкости конфокальным датчиком, который непрерывно фиксирует изменение уровня слоя жидкости. Регистрируются температуры нагревательного элемента, жидкости и окружающей среды. Сигнал последних фиксируется с помощью термопар, установленных в разных частях нагревательного элемента. Сигнал с термопар поступает на контроллер и с помощью программы Signal Express данные по измерению температур записываются в буфер обмена ПК и выводятся на экран. Когда как информация об изменении локальных характеристиках жидкости поступает от сенсора на контроллер, а от него через Ethernet-интерфейс в программный пакет IFD2451 Tool V3.1.2, где и показывается на буферном окне инструмента в режиме реального времени.

2.3.2 Методика расчета теплового потока, скорости испарения с поверхности слоя жидкости и коэффициента теплоотдачи

Тепловой поток можно рассчитать несколькими способами:

1. Используя закон Джоуля-Ленца, по мощности тепла, выделяемого пьезоэлементом:

$$Q = I \cdot U;$$

где Q – тепловой поток, Вт, I – сила тока, А, U – напряжение, Вт. Данный способ расчета малоэффективен, т.к. не учитывает потери тепла через корпус рабочего участка.

2. По перепаду температур в двух различных сечениях пластины. В таком случае, тепловой поток находится следующим образом:

$$Q_2 = \lambda \frac{\pi d^2}{4l} \cdot \Delta T,$$

где λ - теплопроводность медной пластины, $Вт / (м \cdot К)$, l - толщина медной пластины, $м$, d - диаметр медной пластины, $м$, ΔT - разница температур между сечениями пластины, $К$. Температура будет находиться как среднее арифметическое показаний термопар, расположенных в одном сечении по высоте. Этот метод позволяет определить локальные значения плотности теплового потока с высокой точностью.

3. По расходу испарившейся жидкости. Тепловой поток:

$$Q_3 = r \cdot G,$$

где r - скрытая теплота парообразования, $Дж / кг$, G - расход испарившейся жидкости, $кг / с$, определяется с помощью конфокального датчика экспериментально. Конвективными потоками на поверхности слоя жидкости принято пренебречь.

Так же установлено, что искривлением поверхности раздела в тонких слоях жидкости можно пренебречь, т.к. на рабочем участке этот эффект проявляется в узкой области на краю слоя, где не проводится измерение толщины слоя жидкости.

Плотность теплового потока:

$$q_i = \frac{Q_i}{S}, \frac{Вт}{м^2},$$

где S – площадь поверхности теплообмена, $м^2$.

Массовую скорость испарения в зависимости от меняющейся толщины слоя жидкости найдем по следующей формуле:

$$G_i = \frac{(h_i - h_{i+1})}{\tau}, \frac{кг}{м^2 \cdot с},$$

где h_i - толщина слоя жидкости в начальный момент времени измерения, h_{i+1} - толщина слоя жидкости в последующий момент времени, $м$, через временной интервал τ , который определяется частотой измерения датчика, $с$.

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{q}{T_s - T_w}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C},$$

где q - плотность теплового потока, $Вт / м^2$, T_s - температура пара над слоем жидкости, $^\circ C$, T_w - температура подложки, $^\circ C$.

2.4 Программное обеспечение

Для проведения эксперимента и для управления оборудованием используются следующее программное обеспечение:

- LabView SignalExpress 2012,
- IFD2451 Tool V3.1.2.

2.4.1 NI LabView SignalExpress

NI SignalExpress – программное обеспечение, позволяющее в реальном времени получать значения от приборов сбора данных, совместимых с NI LabView, попутно представляя полученные значения в виде графических зависимостей от времени или итераций. В существующей экспериментальной установке NI SignalExpress используется для фиксации и

записи значений, полученных с термопар. Интерфейс LabVIEW SignalExpress 2012 представлен на рисунке 0.

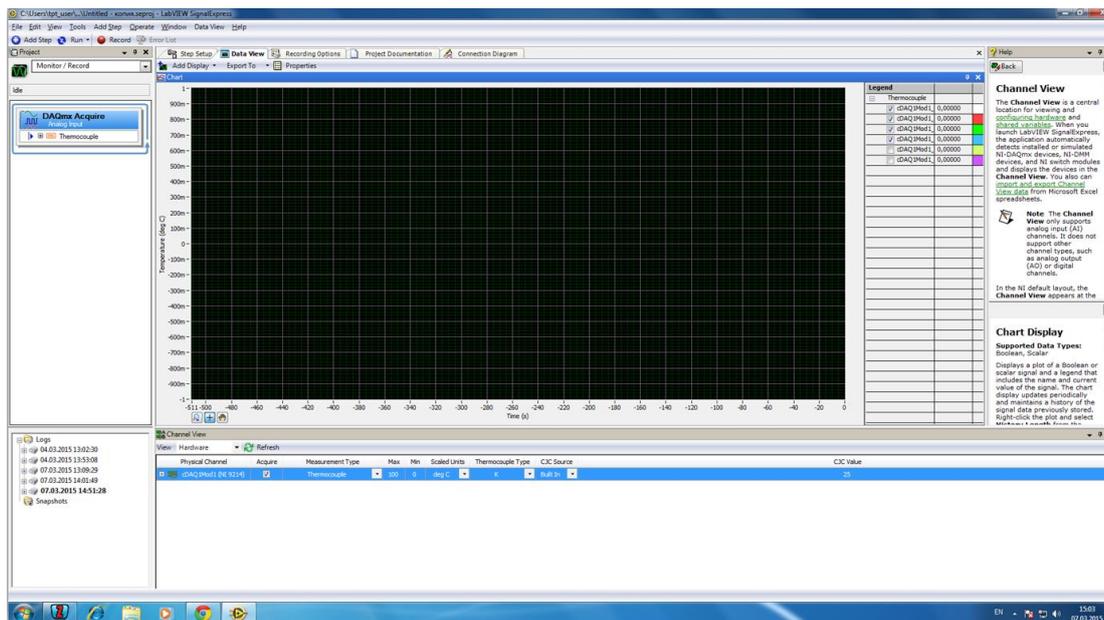


Рисунок 0.7 – NI LabVIEW SignalExpress 2012

Для работы с данными необходимо добавить используемые приборы в программу, задать параметры измеряющих инструментов. Выполняется это через команду Add Step в панели управления программой (рисунок 0.). Каждый прибор обозначается уникальным цветом для удобства представления информации.

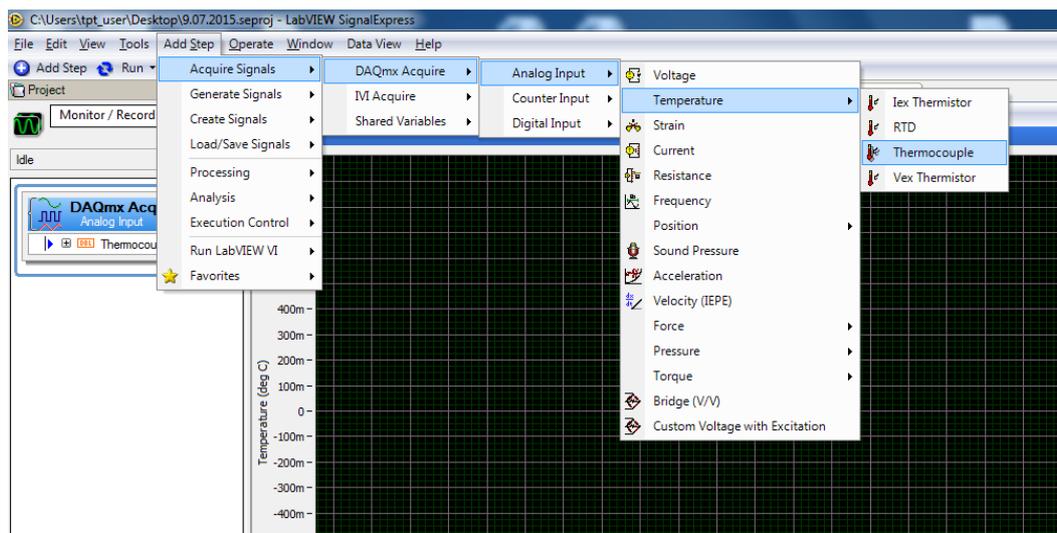


Рисунок 0.8 – Регистрация входного сигнала от термопар

После добавления необходимых термопар, необходимо перейти на буферное окно (вкладка Data View, открыта на рисунке 0) внести те

инструменты, которые фиксируют необходимые данные. Сделать это можно с помощью контекстного меню, открывающееся правым кликом по буферному окну (рисунок 0.).

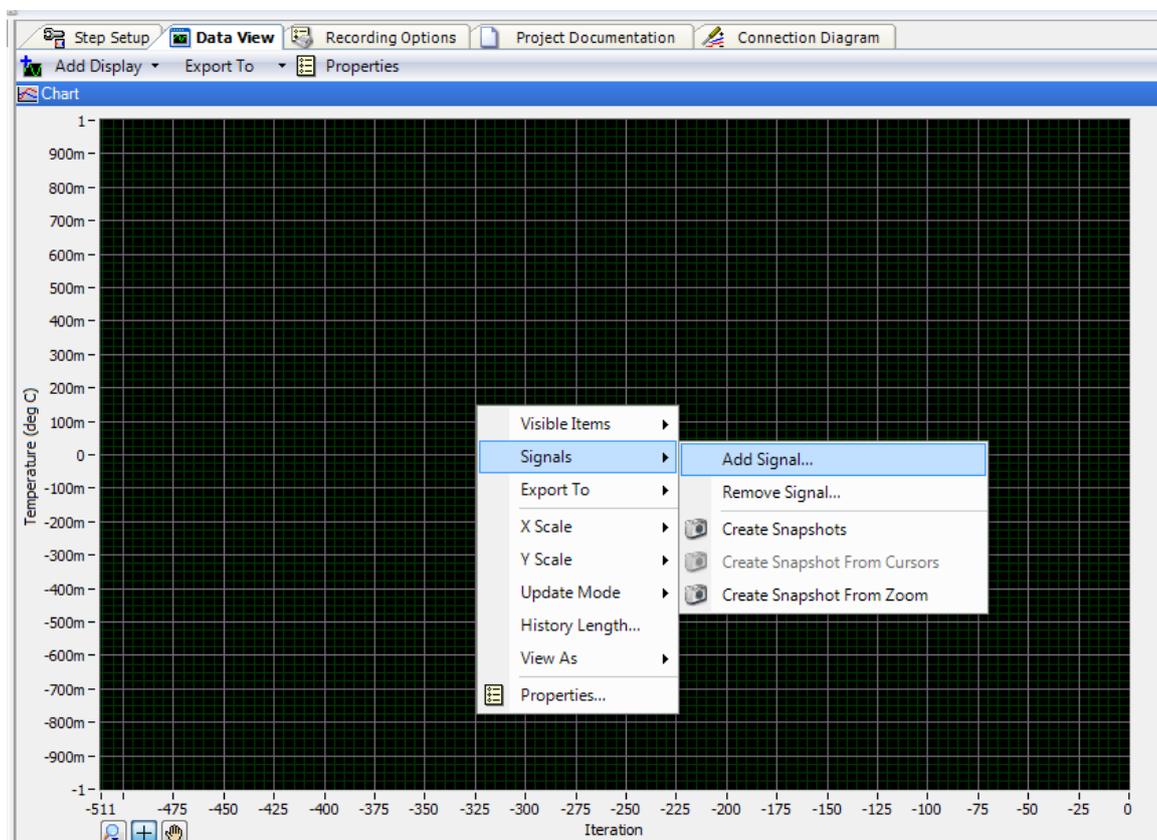


Рисунок 0.9 – Добавление регистрируемых данных на область просмотра результатов

После произведенных операций для регистрации данных необходимо запустить программу, нажав кнопку Run в панели управления программой. LabView SE позволяет выводить на экран данные с требуемых приборов, не показывая остальные, через меню справа от области построения на рисунке 0.

Для записи данных требуется нажать кнопку Record в панели управления программой, выбрать те приборы, с которых нужно производить запись, и нажать ОК. Время записи, размер файла и другие параметры можно посмотреть во вкладке Recording Options (рисунок 0.1).

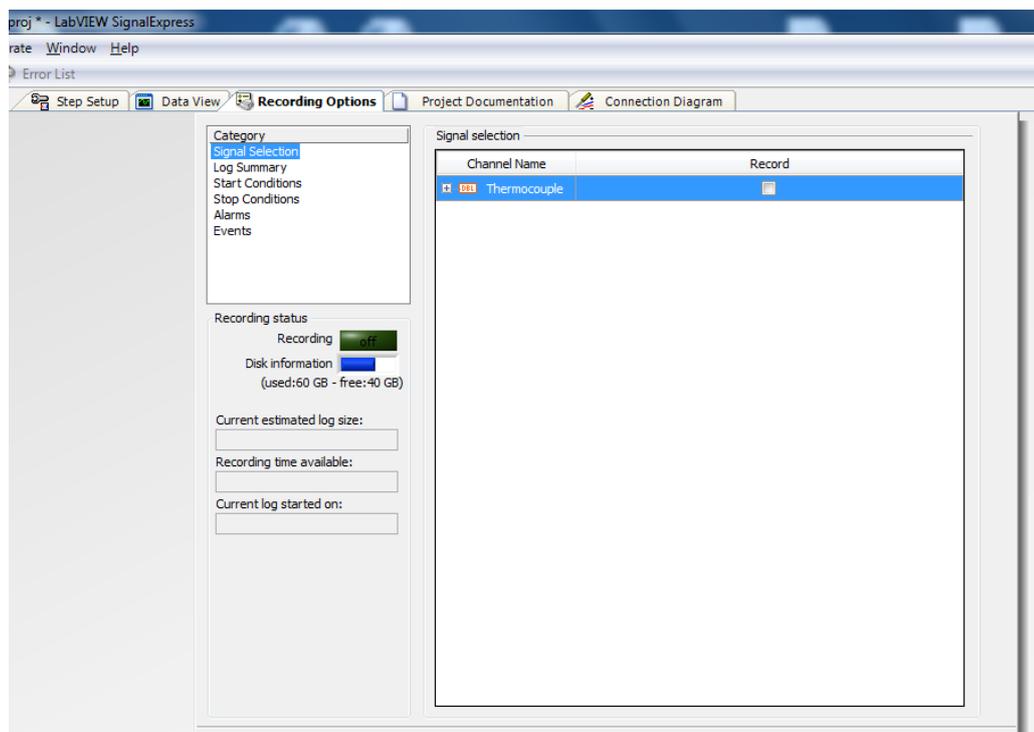


Рисунок 0.1 – Параметры записи результатов в программе NI LabVIEW SignalExpress

Полученные данные по умолчанию сохраняются в журнале событий (левое нижнее окно программы на рисунке 0). При необходимости, можно сохранить, нажав в панели управления File – Save Project.

Измерения, полученные в процессе проведения эксперимента и записанные в программу, можно экспортировать в другое ПО, например, Microsoft Office Excel. Так же можно посмотреть полученные измерения в виде графической зависимости между измеряемой величиной и временем на буферном окне Data View, достаточно перетащить запись данных из журнала на экран Data View.

Программа гибко настраивается по различным параметрам: скорость обновления данных, область построения и т.д.

2.4.2 IFD2451 Tool V3.1.2

Описание программного обеспечения конфокального оборудования Micro-Epsilon ConfocalDT 2451[3].

В комплекте с установкой конфокального оборудования идет программное обеспечение с открытым кодом IFD2451 Tool V3.1.2, которое позволяет работать с датчиком через Ethernet-интерфейс.

В состав программного обеспечения входят драйвера:

1. FTDI_USB-RS422_Converter_V2.0 – драйвер для USB интерфейса, который позволяет конвертировать FTDI FT232RQ USB в серийный UART интерфейс IC устройства, который способен обрабатывать все USB сигналы и протоколы;

2. IF2004 и IF2008 – драйвера для соответствующих интерфейсов, которые позволяют различно захватывать исходящие сигналы от сенсора датчика. В нашей работе используется интерфейс IF2008, работающий на технологии Plug and Play (KMDF, 32/64 bit, WinXP или выше), который позволяет использовать 2 датчика (5V TTL и 1Vss sine) по 32-битной архитектуре, 2 ADC (+-10V, +-5V, 0-10V, 0-5V), 16 бит и 4 DI и 4 DO, 6 Trg;

3. USBIO – USB драйвер для ILD1401-контроллера;

4. WinUSB – USB драйвер для датчиков IFD2401 и IFD2431.

Установочные файлы для программного обеспечения:

1. IFD2451 Tool V.3.1.2 Setup – установочный файл для программы IFD2451 Tool V.3.1.2, которая и позволяет работать через IF2008 интерфейс с конфокальным оборудованием;

2. MEDAQlib 3.1.2.15757 Setup – установочный файл программы MEDAQlib 3.1.2.15757, которая позволяет значительно упростить взаимодействие с различными цифровыми датчиками. Программа обеспечивает разнообразный интерфейс для приложений, использующихся в Windows;

3. SensorFinder V1.18 – программа, необходимая для поиска сенсора и определения его ip-адреса (если оборудование работает через Ethernet-кабель);

4. Update sensor – программа, необходимая для обновления программного кода для сенсора датчика;

5. vcredist_x86 – обновление определений функций для программ, создававшихся в Visual C++;

После установки всех необходимых драйверов, приложений, подключения датчика к питанию и ЭВМ, необходимо запустить IFD2451 Tool V3.1.2. Этот инструмент позволяет беспрепятственно взаимодействовать с сенсором датчика, меняя различные режимы работы, такие как измерение дистанции до исследуемой поверхности и толщины слоя жидкости или прозрачной поверхности.

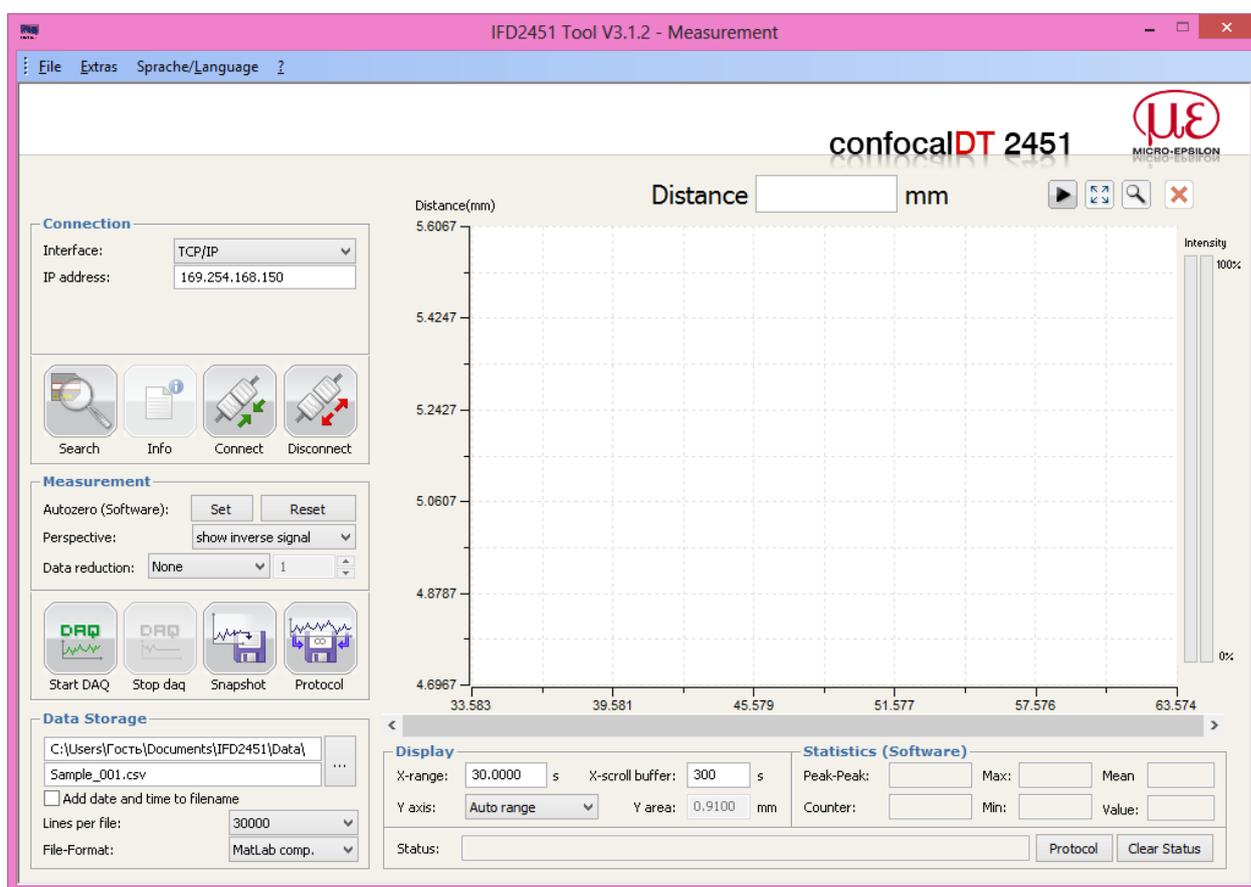


Рисунок 2.11– общий интерфейс IFD2451 Tool V3.1.2

Интерфейс инструмента достаточно прост: в центральной области находится буферный дисплей, который по своей сути двумерный график зависимости расстояния по ординате (Distance, mm) от времени по абсциссе. В левой части располагается панель контроля сенсора (Connection), где выбирается интерфейс подключения – TCP/IP, RS232/RS422-Converter и IF2008. В нашем случае мы используем протокол TCP/IP с ip-адресом

169.254.168.150. Далее находятся кнопки поиска, информации, подключения и отключения сенсора датчика, соответственно, Search, Info, Connect и Disconnect.

При снятии измерения с сенсора датчика с определенной частотой будут откладываться значения расстояния от какой-то установленной величины: либо от начала области измерения (SMR), либо от определенного установленного значения, которое можно задать в левой части инструмента Measurement>Autozero(Software). Так же можно запросить откладывать значения расстояния в инверсии, то есть показывать значения от поверхности, а не до неё. Устанавливается этот параметр по пути Perspective>show inverse signal.

Следующая возможность заключается в параметре Data reduction – сжатие данных, в записи значений определенной области информации. Далее кнопка Start DAQ – запускает сканирование исследуемой поверхности, Stop daq – соответственно прерывает. Snapshot – скриншот области данных графика, Protocol – запись всех полученных данных в определенном формате.

Data Storage – хранилище данных. Расположение и название искомого файла с полученными измерениями. Так же с помощью галочки в поле Add date and time to filename можно закрепить дату и время полученных результатов. Lines per file – количество сохраненных значений в одном сохраненном файле. File-Format – формат файла полученных результатов измерения.

В области Display можно устанавливать следующие параметры: закреплять наблюдения за данными с помощью Y axis – автоматический выбор области наблюдения, центрованное получение данных и заданная дальность обзора полученных значений (Manual range). Параметр X-range позволяет настроить количество секунд, отслеживаемых по оси абсцисс. X-scroll buffer устанавливает предел перемотки времени.

Область Statistics (Software) позволяет вести статистику по получаемым измерениям.

Так же над графиком есть переменное значение Distance в миллиметрах, обозначает расстояние в зависимости от перспективы: до поверхности или от неё. Но в режиме измерения толщины слоя прозрачной жидкости или материала на том же месте Thickness означает значение глубины, в миллиметрах. Справа от значений есть кнопки Continue, Zoom Out, Zoom In и Clear. Continue возвращает координату времени в нормальный размер и показывает самые новые значения по времени. Zoom out – отдаляет предел на 100 секунд от буферных значений. Zoom in – увеличение графика мышкой для более удобного анализа значений. Clear – стереть все данные с буферного дисплея (графика).

В верхней части есть вкладки File, которое подразумевает под собой функцию Close – выход из программы. Extras – дополнительные возможности. Sprache/Language – выбор языка между английским и немецким.

Во вкладке Extras так же находятся возможности, такие как:

1. Sensor finder – встроенная утилита для поиска сенсора датчика;
2. Display – позволяет вводить на буферный дисплей дополнительные отслеживаемые параметры измерения;
3. Configuration – настройка работы конфокального датчика;
4. Measurement – показывает буферный дисплей измерений;
5. VideoMode – показывает буферный дисплей видеозахвата параметров;
6. Show error log – показывает логи ошибок в работе приложения;
7. Export/Import Parameters – необходимо для загрузки или сохранения собственных настроек и параметров работы конфокального датчика.

Подробнее стоит остановиться на таком разделе, как Configuration. Он включает в себя широкие возможности по настройке необходимых параметров измерения, позволяя получить емкие и точные измерения локальных характеристик поверхностных процессов.

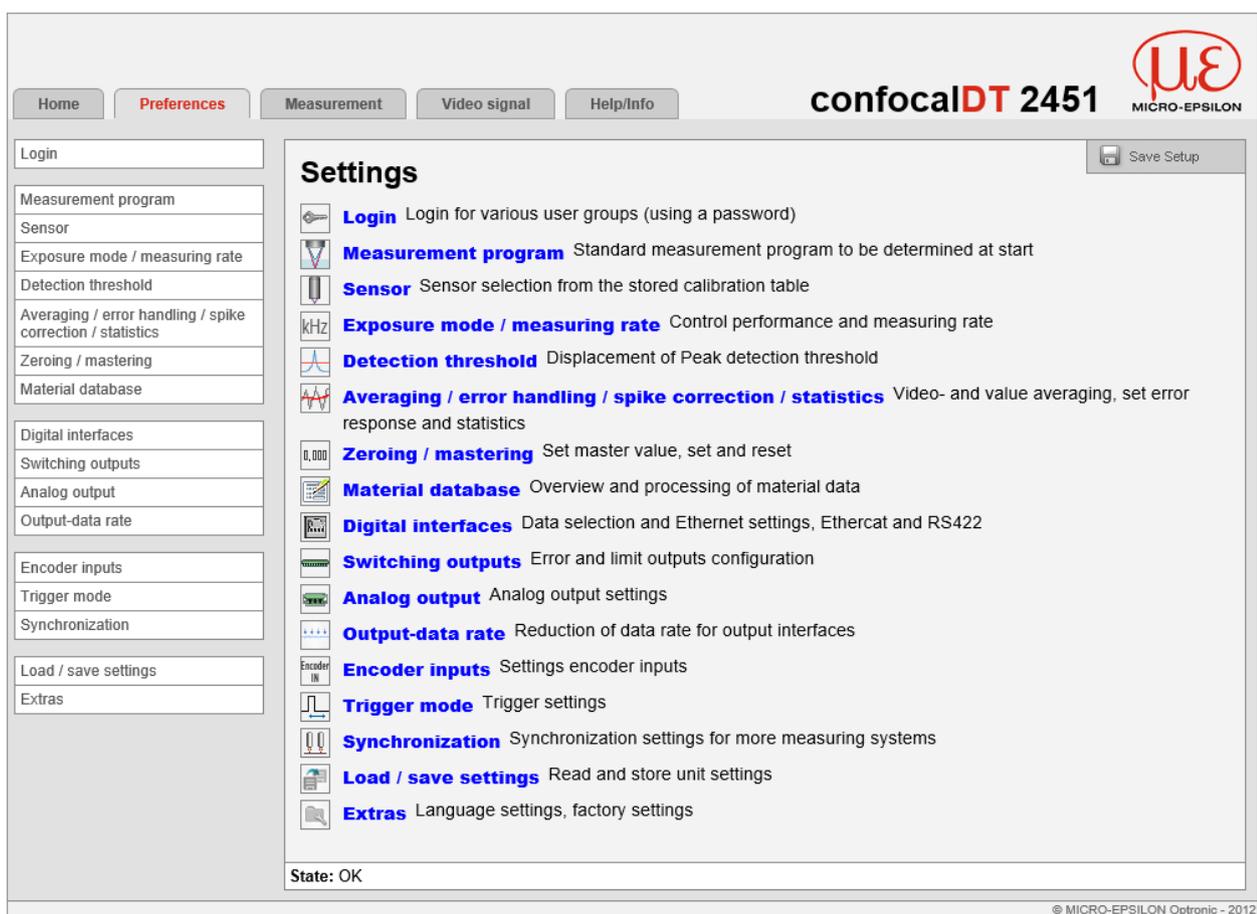


Рисунок 2.12 – общий вид настроек конфокального датчика confocalDT 2451

Во вкладке Login можно устанавливать приоритет работающего с датчиком: professional – полные полномочия или user – ограниченные полномочия. Так же предусмотрена установка пароля для ограничения доступа к настройкам датчика.

Далее следует важная вкладка – Measurement program. Позволяет выбрать режим работы датчика – измерение расстояния до исследуемой поверхности или толщину прозрачной поверхности.

Sensor – предлагает на выбор два сенсора. IFS2405-10 SN:1356 позволяет получать более грубые измерения с точностью до 1мкр, но радиус измерения будет значительно выше – 50мм, вместо 10мм у IFS2405-1 SN:1192 и точности 0,1мкр. Остальные характеристики сенсора можно посмотреть на рисунке 3.

Sensor model	IFS	2403-0,4	2403-1,5	2403/90-1,5	2403-4	2403/90-4	2403-10	2403/90-10
Measuring range		0.400 mm	1.5 mm	1.5 mm	4 mm	4 mm	10 mm	10 mm
Start of measuring range approx.		2.8 mm	8.1 mm	4.9 mm ¹⁾	14.7 mm	12 mm ¹⁾	11 mm	8.6 mm ¹⁾
Spot diameter		9 μ m	15 μ m	15 μ m	28 μ m	28 μ m	56 μ m	56 μ m
Linearity (displacement measurement)		0.3 μ m	1.2 μ m	1.2 μ m	3 μ m	3 μ m	20 μ m	20 μ m
		$\leq \pm 0.08 \% \text{ FSO}$						$\leq \pm 0.2 \% \text{ FSO}$
Linearity (thickness measurement)		0.6 μ m	2.4 μ m	2.4 μ m	6 μ m	6 μ m	40 μ m	40 μ m
		$\leq \pm 0.16 \% \text{ FSO}$						$\leq \pm 0.4 \% \text{ FSO}$
Resolution ²⁾		16 nm	60 nm	60 nm	0.2 μ m	0.1 μ m	0.2 μ m	0.2 μ m
Thickness measurement ³⁾		0.06 mm	0.23 mm		0.6 mm		1.5 mm	
Weight, with cable		36 g						
Max. tilt (direct reflexion)		$\pm 13^\circ$	$\pm 16^\circ$	$\pm 16^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 6^\circ$
Outer diameter sensor		8 mm						
Protection class		IP 40						

Рисунок 2.13 – общие характеристики сенсоров серии IFS 240X

Exposure mode/measuring rate – режим измерения/частота или скорость измерения. Включает в себя:

- Automatic mode – позволяет измерять каждый объект с максимально возможной частотой измерения, скорость измерения и затем время воздействия регулирования меняется.

- Measurement mode – частота измерений задает (или подгоняет) неизменное время воздействия для регулирования. Меньшая величина регулировки используется в случае быстрых измерений. Измерение объектов с различными характеристиками отражения могут быть измерены с той же частотой измерения:

- Manual mode – режим без автоматической регулировки, параметры выбираются единожды пользователем. Это целесообразно в случае быстрых движений, вызванные расширением или сужением измеряемых объектов с похожими поверхностями или с интенсивными динамическими движениями (без перерегулирования). В этом режиме не стоит измерять поверхности, которые подвержены сильным колебаниям. Ручной режим может так же использоваться в случае многослойности измеряемой поверхности, когда самый верхний слой не должен влиять на измерения. Подходящая частота измерения и время выдержки могут быть использованы для отображения видеосигнала в автоматическом режиме.

- **Automatic Two-Time-Mode** – самый быстрый режим с двумя вручную заданными временами воздействия, лучшее из которых выбирается автоматически. Рекомендуется в случае измерения поверхностных характеристик объекта в условии сильных колебаний.

- **Alternating Two-Time-Mode** – режим с двумя заданными вручную временами воздействия, которые подаются попеременно, для двух разных пиков при измерении толщины исследуемой поверхности. В частности рекомендуется в случае исчезновения малого или большего пика над исследуемой поверхностью.

Detection threshold – замечаемая погрешность измерения, выражается в процентах. Можно задать максимальную погрешность отражения пиков на буферном дисплее.

Averaging/error handling/spike correction/statistics – настраиваются различные параметры, такие как:

- **Averaging** – усреднение получаемых значений. Необходимо для устранения шумов сигнала или для подавления выпадающих значений. **Video averaging** – выравнивает получаемые результаты из 2,4,8 видеосигналов и превращает в один пик. **Measured value averaging** – усреднение измеряемого параметра в Measurement. **Number of values for the median** – число значений, используемых для медианы.

- **Error handling** – обработка ошибок в случае непопадания пиков в область измерения. **Hold last value** – удерживать последнее значение; **Error output, no measurement value** – вывод ошибки, отсутствие значения вышедшего за предел пика.

- **Spike correction** – коррекция пиков, где **Evaluation length** – оценка длины; **max. tolerance range** – максимально допустимая область значений; **Number of corrected value** – число корректируемых значений.

- Statistics number of measured values for calculation – количество значений измерения, использующихся для расчета, где All measured values – использование всех значений измерения.

2.4.2.1 Алгоритм работы с конфокальным датчиком confocalDT

2451

1. Произвести подключение сенсора конфокального датчика к контроллеру элементов управления с помощью разъема «Sensor»;
2. Подключить контроллер элементов управления конфокального датчика к ЭВМ с помощью кабеля Ethernet в соответствующие разъемы: EtherCAT на панели контроллера и разъем сетевого кабеля на сетевой карте ЭВМ;
3. Присоединить провода питания сначала к контроллеру элементов управления панели Power: «+» к выходу 24 VDC, «-» к выходу GND;
4. Присоединить провода питания к источнику питания: к клеммам варьируемого напряжения подключить соответственно, зажать тумблером контакт. Важно! Рабочее напряжение от источника питания подавать в пределах $\pm 15\%$ от 12 В, сила тока не более 1А;
5. Запустить ЭВМ с предварительно установленным программным обеспечением IFD2451 Tool V3.1.2 MICRO-EPSILON®;
6. Задать выходное напряжение и силу тока на источнике питания в районе рекомендуемых значений для стабильной работы датчика;
7. Включить контроллер элементов управления с помощью выключателя «Power On»;
8. Запустить программное обеспечение IFD2451 Tool V3.1.2 MICRO-EPSILON®;
9. Дождаться, пока сенсор идентифицируется программой по ip-адресу, затем нажать Connect;
10. Снять колпак с сенсора датчика;
11. Выбрать режим измерений.,
Extras>Configuration>Setting>Measurement program и выбрать в поле

Measurement либо Distance Measurement (для измерения расстояния до исследуемой поверхности), либо Thickness measurement (для измерения глубины исследуемой жидкости);

12. Выбрать сенсор. Проследовать по пути Extras>Configuration>Setting>Sensor и выбрать нужный сенсор в зависимости от необходимой точности и размеров области измерения: IFS2405-10 SN:1356 или IFS2405-1 SN:1192;

13. Зафиксировать эталон черного цвета. К датчику плотно подставить непрозрачную поверхность (желательно черного цвета) и на контроллере нажать кнопку «Dark reference». Подождать 20 секунд, после реагирования световых индикаторов отпустить;

14. Зафиксировать исследуемую поверхность в области измерения Measuring range в зависимости от сенсора;

15. При различных режимах измерения (дистанция или глубина) можно пользоваться инструментами, такими как:

i. Обнуление (autozero) – можно задать точку начала измерения от нулевой координаты;

ii. Расположение измерения (perspective) – ставя inverse signal или normal signal можно получить, соответственно, значения расстояния от поверхности или значения расстояния от датчика до поверхности;

iii. Start DAQ – запуск измерения, Stop daq – остановка, Snapshot – фиксация момента измерения, Protocol – запись полученных результатов в .csv формате;

iv. Data Storage – расположение полученных результатов;

v. Меняя фиксацию y-координаты можно получать различные области наблюдения: auto range – автоматическое определение области, auto-center – автоматический захват центра измерения, manual range – настраиваемая область наблюдения за измерением;

vi. Zoom out, Zoom in – удаление и приближение изображение, Continue – продолжение измерения, Clear – очистка изображения;

16. Проведя измерения и получив необходимые результаты в виде массива данных .csv формата, необходимо нажать кнопку Disconnect в приложении, закрыть колпаком сенсор датчика, убрать подложку, на контроллере выключить питание с помощью выключателя Power On. Далее отсоединить провода от источника питания, выключить источник питания выключателем Power .

2.5 Основные размерные параметры воздействия и выходные переменные планируемого эксперимента

Основной размерный термодинамический параметр, влияющий на результаты экспериментов – это температура подложки, регулируемая с помощью изменения количества тепла, подводимого к подложке.

Выходными параметрами являлись толщина слоя жидкости, массовая скорость испарения и коэффициент теплоотдачи с поверхности жидкости, коэффициент аккомодации при различных температурах слоя жидкости, величина температурного перепада на поверхности раздела фаз жидкость-воздух.

2.6 Точность измерения основных параметров

Температуры в процессе проведения экспериментальных исследований измерялись термопарами. Сигнал с последних, проходящий через АЦП, регистрировался программным обеспечением LabView Signal Express 2012. Точность измерения температур в данной работе составляет 0,01 °С.

Толщина слоя жидкости фиксировалась конфокальным датчиком , управление которым обеспечивает программное обеспечение IFD2451. Измерение его положения производилось с точностью 1 мкм. Частота измерения составила 1 кГц. Значения фиксировались до конечной толщины слоя 0,4мм, далее происходил срыв сигнала.

Начальный объем жидкости, размещался на подложке дозирующим устройством (шприцем) с точностью 0,1 мл.

ВЫВОД ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Выше была показана экспериментальная установка с описанием основных элементов. Основными элементами установки являются рабочий участок, оборудование для определения толщины слоя жидкости: конфокальный датчик, система измерения температуры: термопары, контроллер. Разработана методика проведения экспериментов по измерению толщины слоя жидкости в исследовании процессов испарения плёнок жидкости. Точность измерения температур в данной работе составляет 0,01 °С. Толщина слоя жидкости измерялась конфокальным датчиком ConfocalDT 2451, управляемым программным обеспечением IFD2451 V3.1.2. Измерение толщины слоя жидкости проводилось с точностью 1 мкм. Начальный объем жидкости, размещался на подложке дозирующим устройством (шприцем) с точностью 0,1 мл. Для регистрации и регулирования данных использовалось следующее программное обеспечение: LabView SignalExpress 2012, для регистрации температур, и IFD2451 V3.1.2 для управления конфокальным датчиком. Описан принцип действия установки для проведения исследований кипения и испарения тонких слоев жидкости.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б2Б	Працкевич Владислав Александрович

Институт	ЭНИН	Кафедра	Теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника 13.04.01

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость ресурсов принять согласно рыночной цене.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Рассчитать социальные отчисления по упрощенной схеме (27% от суммы заработной и дополнительной платы)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Определение потенциала исследования.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Не разрабатывается
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Определение этапов работы, трудоемкости работы, составление план-графика, сметы затрат, расчет нарастания технической готовности работ
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка научно-технического уровня НИР.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Працкевич Владислав Александрович		

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Введение

Перспективность научного исследования определяется не только актуальностью исследований, но и коммерческой выгодой от разработки. Обоснование коммерческой ценности является главным условием при поиске финансирования для экспериментальных исследований. Этот пункт важен для исследователей, так как необходимо представлять перспективы и выгоды научных исследований.

Цель проекта – организация и проведение научно-исследовательской работы (НИР), которая отвечает современным требованиям по ресурсоэффективности и ресурстосбережению, а так же имеет экономическое обоснование для проведения НИР.

Решались следующие задачи:

- Оценка актуальности проведения НИР;
- Поиск возможных альтернатив проведения НИР;
- Организация НИР;
- Оценка эффективности НИР.

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

4.1 SWOT-анализ

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

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

➤ **Спрос, характер спроса**

В настоящее время процессы 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 экспериментаторы и теоретики в области исследования процесса испарения капель.

➤ **Поставщики**

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

➤ **Контактная аудитория**

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

➤ **Аудиторией влияния**

Аудиторией влияния являются руководители и сотрудники Томского Политехнического Университета.

Рассмотрим внутреннюю среду:

➤ Проектный продукт и его характеристики

Продуктом проекта будут результаты экспериментальных исследований, которые будут дополнением к теории тепло и массопереноса в условиях интенсивного испарения жидкости, в частности определение влияния температуры, материала поверхности и состава жидкости на скорость испарения, коэффициент теплоотдачи. Также данные результаты могут быть положены в основу построения моделей и составления эмпирических зависимостей по процессу тепломассопереноса в условиях испарения.

➤ Обеспеченность, потребность в основных средствах

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

➤оборотный капитал

Оборотный капитал отсутствует.

Таблица 0.1– SWOT анализ

СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ «S» - Strengths	СЛАБЫЕ СТОРОНЫ «W» - Weaknesses
Возможность получения новых, никем ранее не полученных, результатов	Присутствие серьезных конкурентов
Применение полученных результатов в различных направлениях модернизации теплотехнических технологий в энергетике	Высокая стоимость оборудования
Новое высокотехнологическое	Большое количество

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

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

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

Модель экспертной оценки построена по следующим параметрам:

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

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

Таблица 0.2- Методы расчета теплового потока с нагревательного элемента

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

Таблица 0.3 – Оценка эффективности методов первым экспертом

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

Таблица 0.4 – Оценка эффективности методов вторым экспертом

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

Таблица 0.5 – Оценка эффективности методов третьим экспертом

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

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

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

В таблицах 0.6 и 0.7 представлены значения весовых коэффициентов, оценки эффективности методов и итоговые экспертные оценки.

Таблица 0.6 – Весовой коэффициент и оценка эффективности методов

Эксперт	Метод	Простота		Точность		Наглядность		Отсутствие влияния внешних факторов		Адаптированность к установлению зависимостей	
		W_i	$\frac{V_i^*}{W_i}$	W_i	$\frac{V_i^*}{W_i}$	W_i	$\frac{V_i^*}{W_i}$	W_i	$\frac{V_i^*}{W_i}$	W_i	$\frac{V_i^*}{W_i}$
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
	метод 3		0,39		1,94		2,22		1,11		1,33
2	метод 1	0,16	0,67	0,21	2,08	0,21	1,25	0,21	1,04	0,21	1,67
	метод 2		1,33		1,25		1,88		0,42		1,25
	метод 3		1,17		1,46		1,88		0,63		1,67
3	метод 1	0,15	0,6	0,25	2,25	0,10	0,8	0,25	1,25	0,25	1,75

	метод 2		1,35		0,5		0,9		0,5		0,5
	метод 3		1,05		1,25		0,7		1,5		1,75

Таблица 0.7 – Итоговые экспертные оценки

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

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

4.3 Календарный план

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках научного исследования;
- Определение участников каждой работы;
- Установление продолжительности работ;
- Построение графика проведения научных исследований.

В таблице 0.8 представлен перечень работ и участников в рамках проведения научного исследования.

Таблица 0.8 – Перечень работ и определение участников каждой работы

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

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

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

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

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

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году, $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году, $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

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

Продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях:

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях округлялись до целого числа.

Результаты расчетов сведены в таблицу 0.9.

Таблица 0.9 – 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	30	45	2	47

	обзора				
3	Составление плана проведения эксперимента и выбор метода обработки данных. Постановка целей и задач исследования	7	11	47	58
4	Закупка необходимого (недостающего) оборудования, инструментов, дополнительных деталей. Заказ дистиллированной воды	20	30	58	88
5	Установка и подключение всего оборудования.	2	3	88	91
6	Установка (обновление) необходимого программного обеспечения	2	3	91	94
7	Проведение эксперимента	60	89	94	183
8	Обработка результатов	40	60	183	243
9	Проведение дополнительных экспериментов с целью перепроверки неверных результатов и оценки повторяемости эксперимента	30	45	243	288
10	Обработка дополнительных результатов	20	30	288	318
11	Сравнение результатов с результатами, полученными ранее другими экспериментаторами, определение новизны и написание выводов	7	11	318	329
12	Оформление проделанной работы, составление пояснительной записки	14	21	329	350
13	Проверка проекта	7	11	350	361

По таблице построен график Ганта (рисунок 0.1).

нужды (проведение экспериментов, контроль, эксплуатация оборудования и его ремонт);

- Материалы, используемые в качестве объектов исследований;
- Канцелярские принадлежности, ручки, бумага, картриджи и т.п.

Стоимость каждого материала определяется по формуле:

$$C = K \cdot Ц,$$

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

В таблице 0.10 приведены материальные затраты проекта.

Таблица 0.10 – Материальные затраты проекта

Статьи расходов	Ед. измер.	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
Конфокальный датчик confocal DT2451	Шт.	63743	1	63743
б) Источник света «edmund optics worldwide mi-150»	Шт.	6430	1	6430
7) Компьютер intel core i7-2600k ОЗУ 16 гб	Шт.	39990	2	79980
8) Монитор «Acer H236HLbmjd»	Шт.	9250	2	18500
9) Клавиатура Gembird Wireless KB-315 Black	Шт.	970	2	1940
10) Мышь Logitech M100 optical USB, черная	Шт.	349	2	698

11) Термопары с Модулем ввода сигналов тензодатчиков Reallab NL-1SG	Шт.	9980	7	69860
13) Уравнитель в горизонтальном и вертикальном направлении «GNL18/M - Large Goniometer, 44.5 mm Distance to Point of Rotation, ±5°, Metric»	Шт.	13984	1	13984
14) Электронный магнитный уровень-угломер «ЗУБР ЭКСПЕРТ МИНИ 34745»	Шт.	3909	1	3909
21) Клей Герметик МОМЕНТ силикон	Шт.	117	1	117
22) Канцелярские товары (ручка, карандаш, линейка, ластик, тетрадь, +салфетки)	Шт.	500	1	500
24) Электроэнергия	кВт/ч	4,25	8257	35092
ИТОГО:				343817

В затраты на электроэнергию входит потребление света и использование различного оборудования в течении проекта.

Расходы на электроэнергию представлены в таблице 0.11.

Таблица 0.11 – Затраты на электроэнергию

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

Источник света	5	$77*6=462$	2310
----------------	---	------------	------

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

Таблица 0.12 – Амортизация

	Компьютер	Нагревательный прибор	Фотоаппарат	Источник света
Количество	2	1	1	1
Норма в год, %	20	20	20	20
Первичная стоимость	79980	16074	63743	6430
Величина в год, руб.	3999	804	3188	322
Количество работы оборудования в год, ч	$242*8+5*7=1971$	$62*8=544$	$186*8=1488$	$186*8=1488$
Амортизация в час, руб/час	2,03	1,48	2,14	0,22
Количество часов работы в проекте	1152	462	462	462
Сам	2337,3	682,8	989,8	100
Итого: (Σ Сам)	4110			

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

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

$$C_{з.п.} = 22 \cdot 300 \cdot 28 = 184800 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды $S_{с.н.} = 184800 \cdot 0,3 = 55440 \text{ руб.}$

Суммарные затраты составят: $C_{сум} = 184800 + 55440 = 240240 \text{ руб.}$

Затраты на выполнение проекта приведены в таблице 0.13.

Таблица 0.13 – Затраты на выполнение проекта

Наименование	См, руб.	Сз.п., руб	Сам., руб	Ссум., руб
Выполнение проекта	343817	240240	4110	588167

Общие затраты на реализацию данного проекта составят 588167 рублей.

4.5 Ресурсоэффективность

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по трем вариантам исполнения приведено в таблице 0.14, где исполнение 2 включает в себя использование конфокального датчика confocal DT2451 стоимостью 1339477 рублей, вместо имеющейся фотокамеры D7100, а исполнение 3 характеризуется тем, что установка (стенд) уже собран и докупать оборудование не надо.

Таблица 0.14 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Материальные затраты проекта	343817	1683294	35709
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	240240	240240	240240
Накладные расходы (16 % от суммы ст.	93449	307765	44152

1-2)			
Бюджет затрат проекта (Сумма ст. 1- 3)	677506	2231300	320101

Интегральные показатели финансовой эффективности научного исследования:

$$I^{1\text{ исп}} = \frac{677506}{22310300} = 0,304; \quad I^{2\text{ исп}} = \frac{22310300}{22310300} = 1;$$

$$I^{3\text{ исп}} = \frac{320101}{22310300} = 0,143.$$

Таблица 0.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{1\text{ исп}}^P = 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,2;$$

$$I_{2\text{ исп}}^P = 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,0;$$

$$I_{3\text{ исп}}^P = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4,25.$$

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

Выводы по главе

В настоящей работе проведен SWOT-анализ с исследованием внешней и внутренней среды проекта. Проведена экспертная оценка методов расчета теплового потока, по результатам которой было решено использовать метод расчета по перепаду температур в двух различных по высоте сечениях пластины.

Определена структура работ в рамках научного исследования, продолжительность и участников каждой работы. Построен график Ганта и диаграмма трудозатрат. График бюджета проекта не был построен, так как затраты были выполнены только в один день. Продолжительность выполнения проекта 358 календарных дней.

Затраты на выполнение проекта были рассчитаны в смете и составляют 343817 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.

Вопрос замещения дорогостоящей аппаратуры для фиксации значения толщины слоя жидкости актуален. По этой причине в работе рассматривалась целесообразность использования конфокального датчика вместо линейного актуатора с щупом и дорогостоящей фотокамеры с объективом.