



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



АЛЬБОМ

ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ
СТУДЕНТОВ БАКАЛАВРИАТА

(2021)



О КАФЕДРЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР МЭИ

Кафедра низких температур (НТ) Московского Энергетического института образована в 1975 году. Основным направлением учебной работы кафедры является подготовка инженеров в области криофизики и криогенной техники. Особое внимание уделяется практическому обучению и решению различных прикладных задач, связанных с разработкой и эксплуатацией криогенных систем.

Научные направления работы кафедры сосредоточились вокруг проведения физических исследований процессов, происходящих при температурах ниже 120К. Экспериментальные исследования и численные модели физических процессов посвящены изучению теплообмена при фазовых превращениях в условиях низких температур. Особое место занимают здесь вопросы изучения теплопередачи в сверхтекучем гелии-II.

Научные группы профессоров Бродянского В.М., Григорьева В.А. и Лабунцова Д.А. внесли существенный вклад в развитие криофизики и становление научно-образовательного процесса.

Лабораторная база кафедры низких температур включает в себя ряд экспериментальных стендов и установок. Развитием практического направления исследований поспособствовал учебный криоцентр с установкой по ожижению гелия.

ИЗ ИСТОРИИ КАФЕДРЫ

Специальность 0579 «Криогенная техника» была образована в 1973 году с целью подготовки специалистов широкого профиля для работы в отраслях народного хозяйства СССР. Основной задачей обучения являлась подготовка криофизиков, способных решать

многофакторные инженерные и научные задачи, связанные с разработкой и применением эффективных криогенных систем, в том числе с использованием эффекта сверхпроводимости, а также при проведении физических исследований на уровне криотемператур (менее 120К).

Кафедра Криогенной техники была создана 16 июня 1975 года на базе научных групп профессоров Бродянского В.М., Григорьева В.А. и Лабунцова Д.А. На кафедре начали работать сотрудники в основном двух кафедр ПТЭФа – Теплообменных процессов и установок (ТМПУ) и Промышленных теплоэнергетических и криогенных систем (ПТКС). Преподавателями кафедры стали – Боярский М.Ю. (в дальнейшем - д.т.н., профессор), Грачев А.Б. (к.т.н., доцент), Синявский Ю.В. (к.т.н, доцент), Павлов Ю.М. (в дальнейшем д.т.н., профессор), Клименко А.В. (в дальнейшем д.т.н., профессор, академик РАН), Аметистов Е.В. (в дальнейшем д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН), Ягов В.В. (в дальнейшем д.т.н., профессор), Крохин Ю.И. (к.т.н, доцент), Зенкевич В.Б. (в дальнейшем д.т.н., профессор). Студенты кафедры были первоначально переведены из групп кафедр ТПСК и ТМПУ. В 1976 году по инициативе проректора профессора Григорьева В.А. был создан Энергофизический факультет, в состав которого и вошла кафедра Криогенной техники. Студенты кафедры начали с этого года уже поступать на обучение по открывшейся специальности.

Создание кафедры диктовалось в первую очередь настоятельной потребностью ряда быстро развивающихся отраслей науки и техники, в частности энергетики, в квалифицированных специалистах в области низких

температур, умеющих проводить сложные физические исследования, создавать новые высокоэффективные криогенные системы. Формирование кафедры как самостоятельного подразделения позволило также сконцентрировать усилия сотрудников на решении наиболее важных задач научно-исследовательского характера. Первым заведующим кафедры стал ученый с мировым именем профессор Д.А. Лабунцов.

Кафедра сразу начала эффективно сотрудничать с ведущими организациями, работающими в области криогенной техники – НПО «Криогенмаш» (г. Балашиха), НПО «Гелиймаш» (г. Москва), Институт высоких температур АН СССР (г. Москва), НПО «Энергия» (г. Москва), НПО «Микрокриогенмаш» (г. Омск) и др. Началось создание лабораторной базы. За короткое время кафедра создала лаборатории – Тепло-массообмена, Механики двухфазных потоков, Тепло-массообменных аппаратов, Низкотемпературного эксперимента, Рефрижераторов и ожижителей, дисплейный класс с ЭВМ, криоцентр, с единственной в учебных заведениях Москвы установкой по ожижению гелия.

В связи с тем, что в криогенных системах особый интерес вызывают процессы тепло- и массообмена при фазовых превращениях, кафедра уже в первые годы существования стала проводить обширные экспериментальные и теоретические исследования процессов кипения и конденсации криогенных жидкостей.

В результате этих исследований, выполненных под руководством Д.А. Лабунцова и члена-корреспондента АН СССР, профессора В.А. Григорьева (возглавившего кафедру в 1977 году), удалось выявить, теоретически обосновать и экспериментально подтвердить ряд качественно новых и важных

эффектов в механизмах кипения криожидкостей. Уникальными стали исследования теплообмена в сверхтекучем гелии-II. Созданные на кафедре экспериментальные установки позволили провести изучение теплоотдачи к сверхтекучему гелию в широком интервале режимных параметров, охватывающем области от сопротивления Капицы до пленочного кипения. В этих работах участвовали будущие члены-корреспонденты РАН Е.В. Аметистов, А.В. Клименко, В.В. Клименко, профессор Ю.М. Павлов.

Другим крупным направлением научных исследований кафедры, которое частично перекликается с первым, но имеет и свои специфические особенности, стали работы по тепло- и массообмену и гидродинамике двухфазных сред. Работы велись под руководством профессора Д.А. Лабунцова, основателя научной школы МЭИ в области теплообмена при парообразовании. Основной акцент в исследованиях делался на изучении механизма и характеристиках режимов кипения, анализе условий возникновения кризисов теплоотдачи. Научной группой профессора Д.А. Лабунцова (Городов А.К., Ковмов А.Т., Крюков А.П., Созиев Р.И. Ягов В.В.) впервые было проведено систематическое изучение кипения в вакууме, исследован механизм этого процесса, предложены способы расчета и методы интенсификации теплообмена при пониженных давлениях. Особое значение придавалось также исследованию интенсивных процессов испарения и конденсации на базе молекулярно-кинетической теории. В настоящее время эти исследования продолжают под руководством профессора Крюкова А.П.

Первым заведующим кафедрой в 1975 году стал профессор Лабунцов Д.А., в 1977 году его сменил профессор Григорьев В.А., в 1985 году новым

руководителем кафедры стал профессор Аметистов (1985-2006). С 2006 по 2017 годы кафедрой руководил профессор Дмитриев А.С. На кафедре длительное время осуществлялась подготовка по специальности двух учебных очных групп студентов и одной вечерней. Студенты кафедры проходили практику в Москве, Балашихе, Харькове, Одессе, Байконуре и ГДР.

Большое внимание на кафедре уделялось научным исследованиям. В первые годы интенсивно разрабатывались теоретические и практические вопросы изучения тепломассообмена при фазовых превращениях. Особое место занимают здесь вопросы изучения теплообмена в сверхтекучем гелии-II. Возможность получения жидкого гелия со своего криоцентра резко увеличивала эффективность таких исследований.

В последующие годы на кафедре получили свое развитие другие научные направления:

- исследование эффективности работы низкотемпературных установок с проведением эксергетического анализа;

- термодинамический анализ работы холодильных и криогенных машин с использованием многокомпонентных рабочих тел;

- изучение процессов тепломассообмена и гидродинамических характеристик двухфазных потоков;

- исследование кипения криогенных жидкостей, в том числе азота, фреонов и их смесей.

- исследование процессов тепломассопереноса в сверхтекучем гелии, в том числе при парообразовании в различных условиях;

- исследование теплофизических процессов при хранении, транспортировке и использовании жидких криогенных продуктов;

- исследование процессов переноса на межфазных поверхностях методами молекулярно-кинетической теории и молекулярно-динамического моделирования;

- исследование систем криостабилизации сверхпроводящих систем и установок;

- разработка технологий и методов получения и использования монодисперсных частиц;

- эксперименты по исследованию теплогидравлических процессов в монодисперсных потоках;

- анализ влияния нанопримесей на теплофизические свойства жидкостей;

- создание криовакуумных систем различного назначения.

Сотрудники кафедры неоднократно становились лауреатами Государственных премий.

В 1985 году Государственную премию СССР получили Григорьев В.А, Аметистов Е.В. и Павлов Ю.Б. за исследование кипения криогенных жидкостей.

В 1993 году Государственной премией Российской Федерации был удостоен коллектив сотрудников кафедры: Аметистов Е.В., Блаженков В.В., Городов А.К., Дмитриев А.С., Клименко А.В., а также Безруков В.И., директор инженерного центра «Электрокаплеструйная технология» Санкт-Петербургского института точной механики и оптики, за комплекс научно-технических работ по энергофизическим основам получения и применения монодисперсных систем.

(Указ Президента Российской Федерации «О присуждении Государственных премий Российской Федерации 1993 года в области науки и техники»)

В 2001 году премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники была присуждена Дмитриеву Д.С. в составе коллектива учёных и инженеров за разработку новой методологии, научно-техническое обеспечение и проведение комплекса теплофизических экспериментов в условиях микрогравитации на орбитальной станции «Мир» и внедрение их результатов в совершенствование энергосистем на международной космической станции и космических станциях будущих поколений.

(Постановление Правительства Российской Федерации от 21 марта 2002 г. № 175, п.18)

Научный штат сотрудников кафедры в некоторые годы превышал 100 человек, из них кафедра готовила до 25 аспирантов.

В 2004 году началась подготовка специалистов по новой специальности XXI века – «Наноматериалы». По инициативе заведующего кафедрой, ректора МЭИ Аметистова Е.В. был создан Наноцентр МЭИ, который оснащён современным приборным оборудованием. В 2010 году прошёл первый выпуск специалистов данного направления.

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ

Национальный Исследовательский университет МЭИ (Московский Энергетический институт) входит в десятку лучших технических вузов России. Подготовку инженеров в области энергетики осуществляет структурное подразделение НИУ МЭИ - Институт тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ). На кафедре низких температур (НТ) ведётся учебная и научная работа, посвящённая процессам и явлениям криофизики.

БАКАЛАВРИАТ

14.03.01

Ядерная энергетика и теплофизика

Техника и физика низких температур: средства, способы и методы разработки, исследования, создания и эксплуатации холодильных и криогенных установок, систем, машин и аппаратов, установок кондиционирования.

Объекты профессиональной деятельности выпускника: установки,

машины и аппараты, предназначенные для генерации и использования искусственного холода, для термостатирования различных объектов, для разделения газов, а также комплексы, связанные с разработкой, исследованием и эксплуатацией низкотемпературных систем.

Область профессиональной деятельности выпускника: средства, способы и методы, связанные с разработкой, созданием и эксплуатацией аппаратов и установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию.

Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике: область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомной структурой путём

контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами.

Объекты профессиональной деятельности выпускника: тепловые процессы, протекающие на наномасштабах в элементах энергетического оборудования, устройствах для выработки, преобразования и использования тепловой и ядерной энергии, элементах конструкций приборов, аппаратов и установок.

Область профессиональной деятельности выпускника: средства, способы и методы, связанные с разработкой, созданием и эксплуатацией аппаратов и установок, вырабатывающих, преобразующих и использующих тепловую и ядерную энергию.

МАГИСТРАТУРА

14.04.01

Ядерная энергетика и теплофизика

Техника и физика низких температур: исследование новых технологий и материалов при низких и сверхнизких температурах; изучение особенностей теплофизических процессов в элементах энергетического оборудования при низких температурах; разработка методик исследований, применяемых для получения новых или более надежных научных данных в области ядерной энергетики и теплофизики.

Объекты профессиональной деятельности выпускников: тепловые процессы, протекающие в устройствах для выработки, хранения, преобразования и использования тепловой и ядерной энергии, элементах конструкций приборов, аппаратов и установок, работающих при низких или сверхнизких температурах.

Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике: исследование новых технологий и материалов на

наномасштабах; разработка и создание функциональных материалов для слаботочной и сильноточной энергетики; изучение особенностей теплофизических процессов и систем на наномасштабах, их использования в элементах энергетических установок, экспериментальном и расчетном определении теплофизических свойств функциональных наноматериалов.

Объекты профессиональной деятельности выпускников: тепловые процессы, протекающие в устройствах для выработки, хранения, преобразования и использования тепловой и ядерной энергии, включая нанотехнологии и наноматериалы, которые разрабатываются, создаются и используются в различных областях техники.

АСПИРАНТУРА

Специальность: 1.3.14 - *Теплофизика и теоретическая теплотехника*

«Теплофизика и теоретическая теплотехника» - научная специальность, объединяющая исследования по теплофизическим свойствам веществ, термодинамическим процессам, процессам переноса тепла и массы в сплошных и разреженных, гомогенных и гетерогенных средах.

Экспериментальные и теоретические исследования по теплофизике и теоретической теплотехнике имеют целью установление связей между строением веществ и их феноменологическими свойствами, обоснование методов расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии, выявление механизмов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, излучении, сложном теплообмене и физико-химических превращениях, обоснование и проверку методов интенсификации

тепло- и массообмена и тепловой защиты.

Специальность: *2.4.8 - Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники*

«Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники» - научная специальность, объединяющая исследования по тепло- и массопереносу, сжатию, расширению, фазовым превращениям, охлаждению, криостатированию, сжижению, конденсации в жидкое и твердое состояние рабочих тел при ограничениях,

вводимых конструкцией и средой эксплуатации машин и аппаратов холодильной и криогенной техники.

В рамках специальности разрабатываются технологические процессы разделения, очистки и получения сжиженных и сжатых промышленных и сверхчистых газов, в том числе природного газа, решаются конструкторские, технологические и технико-экономические проблемы по разработке и оценке преобразователей энергии, используемых в холодильной и криогенной технике, в системах кондиционирования и жизнеобеспечения.

ТЕХНИКА И ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Анализ методов охлаждения радиоэлектронного оборудования

Студент: Буряк Г.А.

Научный руководитель: к.т.н. Алексеев Т.А.

Выпускная Квалификационная работа посвящена проблеме охлаждения радиоэлектронного оборудования.

Проблема охлаждения радиоэлектронного оборудования (далее – РЭО) возникла уже несколько десятков лет назад и с каждым годом становится всё острее, так как мощности электронных компонентов постоянно повышаются и вместе с ней повышается и тепловыделение с этих самых электронных компонентов.

В настоящее время существует множество методов охлаждения РЭО, направленных как на снижение температуры и снятия теплового потока как со всей платы и компонентом размещенных на ней, так и для снятия локальных перегревов, возникающих на отдельных, самых мощных элементах. Данная работа ставит перед собой цель проанализировать некоторые из этих методов, используя современное программное обеспечение, методы математического моделирования. В какую сторону двигаться для снижения общей тепловой нагрузки платы, какие средства лучше всего применять для снятия локальных перегревов и насколько большой локальных тепловой поток возможно отвести пользуясь рассмотренными в данной работе методами и возможностями.

Целью работы является выявление параметров платы и/или окружающей среды вносящих наиболее большой вклад в изменение температурного профиля платы с РЭО, подбор

параметров для обеспечения необходимой температуры платы с РЭО, анализ различных методов и инструментов для снятия локального перегрева.

В работе рассмотрены и описаны схемы охлаждения радиоэлектронного оборудования. Написана и описана программа для проведения анализа параметров окружающей среды и платы, влияющих на температурный профиль платы с РЭО. С помощью программы были подобраны параметры для обеспечения рабочей температуры РЭО, размещенного на плате. В специальной среде была создана и протестирована компьютерная модель нескольких различных модификаций выбранной схемы. С помощью программы для компьютерного моделирования был произведен анализ модификаций схемы на предмет максимально возможного рассеиваемого теплового потока, где наилучшим образом себя показала модификация с установленным на элемент радиатором. При такой модификации можно снять с элемента до 87 Вт тепловой нагрузки.

Работа выполнена в полном объеме, решения, примененные в анализе модификаций схемы, в данный момент широко и успешно применяются в сфере охлаждения электроники.

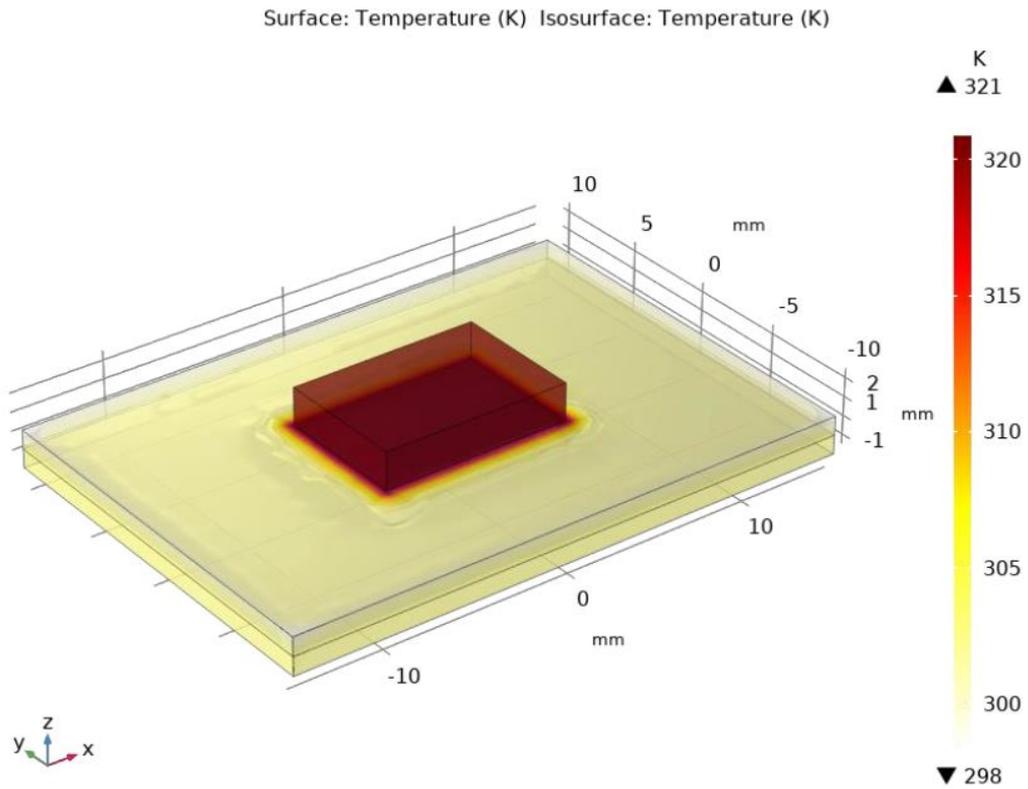


Рисунок 1. Температурный профиль платы с тонким теплопроводящим слоем меди.

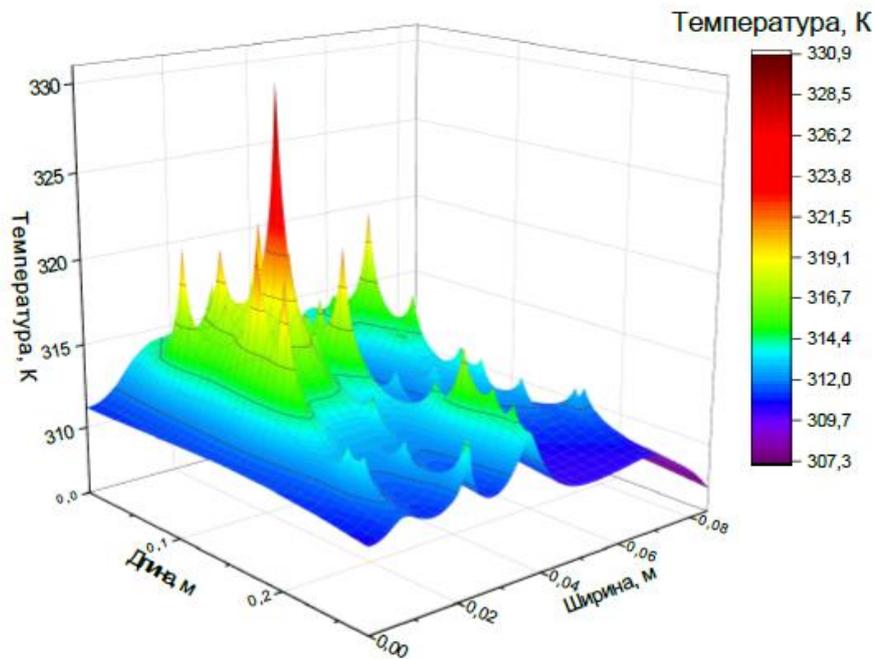


Рисунок 2. Температурный профиль платы со всем РЭО.

Теоретический расчёт холодильной установки для перевозки и долговременного хранения живой рыбы

Студент: Донская А. Д.

Научный руководитель: к.т.н. Миронов И.Ю.

Работа посвящена изучению процесса долговременного сохранения живой рыбы при транспортировке на большие расстояния и хранении при реализации через торговую сеть с помощью применения холодильной машины и аэрации.

Цель работы: рассчитать и спроектировать автономную холодильную установку для транспортировки и хранения (при продаже) живой рыбы. Данная работа носит теоретический характер и включает в себя расчёт теплофизических, термодинамических процессов, подбор холодильного и вспомогательного оборудования и т. д.

Рыба ценный, но скоропортящийся продукт. Без охлаждения свежая рыба без воды портится через несколько часов. Чаще всего она доставляется потребителю в виде консервов, солений, сушёной, замороженной и т.д. При охлаждении ее можно сохранить намного дольше, но для этого нужно использовать специальные холодильный установки.

Особенность работы в том, что рыба будет перевозиться в состоянии "зимней спячки", следовательно, будет иметь высокую питательную ценность и высококачественный товарный вид. Установка планируется для транспортировки и хранения небольшого количества рыбы, что позволит малым рыбным хозяйствам приобрести данные установки. В случае необходимости, возможности установки по количеству перевозимой рыбы можно увеличить.

Приведена установка, в соответствие с которой данная задача может быть реализована. Основными

составляющими данной системы являются: ёмкость для живой рыбы, холодильная машина, вентилятор, дизель-генератор, расположенные на автоприцепе. Ёмкость предназначена для транспортировки и хранения живой рыбы при температуре 2...6°C. Заданный температурный уровень устанавливает и поддерживает парокомпрессионная холодильная машина. Аэрация осуществляется вентилятором. Дизель-генератор обеспечивает электроэнергией. При стоянке система может быть подключена к стационарной электросети. Таким образом, у потребителя появится возможность приобретения недорогой, качественной живой рыбы.

Данный этап разработки является завершённым в качестве эскизного проекта. В дальнейшем планируется на его основе провести подробный расчёт выбранного технического оборудования, а также уточнение его конструктивных особенностей.

Эскизный проект объединил четыре направления: охлаждение биологического продукта, выбор и расчёт холодильного цикла, теплообмен и совместная работа разнообразного сложного оборудования.

Дипломная работа данного этапа послужит основой усовершенствования и оптимизации системы транспортирования на большие расстояния и хранения долгое время живой рыбы.

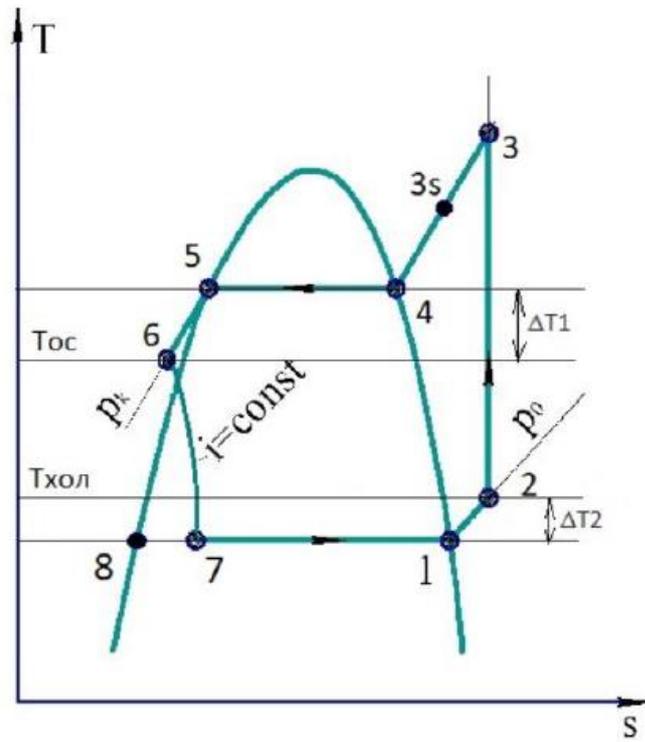


Рисунок 3. Процесс холодильной машины в T-S диаграмме.

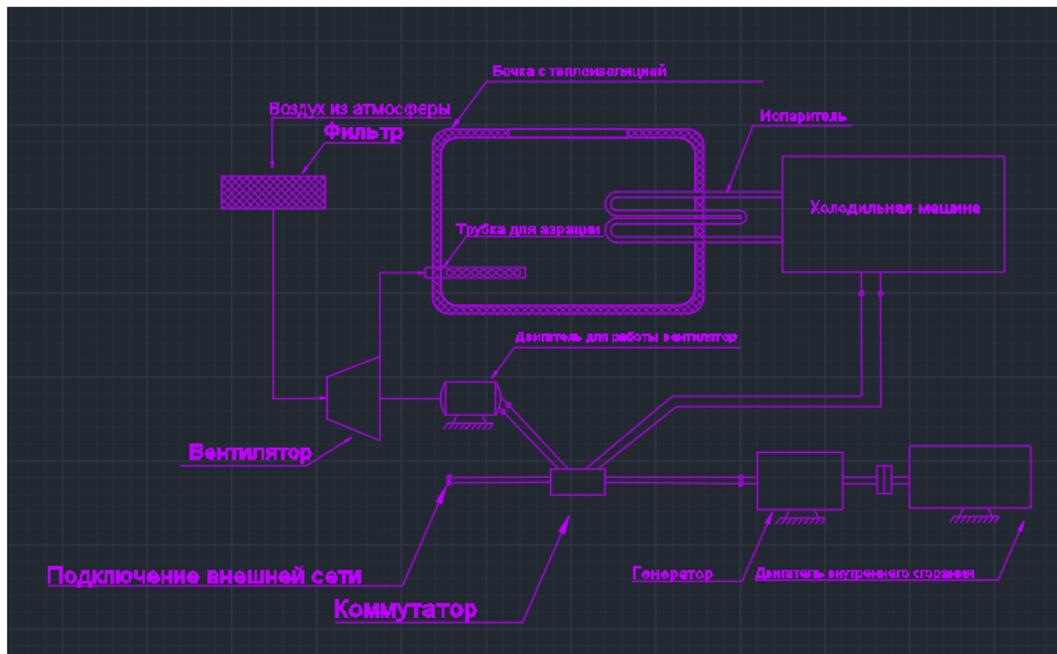


Рисунок 4. Холодильная установка.

Коллективные эффекты при охлаждении и замораживании капель на подложках

Студент: Филимонова К.Ю.

Научный руководитель: д.т.н. Дмитриев А.С.

Работа посвящена исследованию коллективных эффектов при охлаждении и замораживании капель на подложках.

Цель работы: исследование процессов замораживания и свойств замороженных капель воды с добавлением в них нано-коллоидных частиц различных концентраций, определение особенностей процессов, разработка и верификация моделей, описывающих наблюдаемые эффекты.

Данная работа носит экспериментальный характер и включает в себя описания наблюдений и результатов, полученных в ходе экспериментов.

В качестве исследуемой проблемы выступает вопрос обледенения, влияющий на многие отрасли научно-промышленного комплекса: энергетика, транспорт, сельское хозяйство, промышленность, авиация, процесс распылительной кристаллизации, атмосферные исследования и многое другое. Более детальное рассмотрение дано в содержании работы.

В результате работы определены некоторые варианты морфологии замерзания капель воды и наноколлоидов на различных подложках, изучение строилось на основании работ мировых ученых.

В процессе работы проводились исследования по замораживанию на алюминиевой подложке коллектива капель с различной формой нанесения, капли раствора (вода + графен) в зоне действия магнитных полей, а также капли раствора (вода + краситель) различных концентраций.

В результате работы удалось установить, что тепломассоперенос существенно влияет на время замерзания капли: чем больше соседних капель на подложке, тем больше время замерзания.

Обнаружено резкое изменение коэффициента пропускания (индекса преломления в фазовом переходе) в замерзающей капле при сильном охлаждении подложки (около 70 °С).

Не выявлено влияние магнитных полей на форму и морфологию замерзания наноколлоида (97% вода +3% графен), (95% вода +5% графен).

Обнаружено, что добавление графена в состав воды не приводит к изменению привычной формы замерзания капли – на вершине образуется остроконечный пик.

Замораживание наноколлоидов (вода + краситель) привело к получению новой формы замерзшего образца, напоминающей плато.

Удалось получить концентрацию красителя, при которой капля меняет привычную форму замерзания на плато (97% вода + 3% краситель).

Выявлено, что увеличение концентрации красителя ведет к уменьшению времени кристаллизации.

Построены графики зависимостей, которые удалось получить в ходе работы;

Положены основы для теоретического расчета сделанных наблюдений в рамках данной работы.

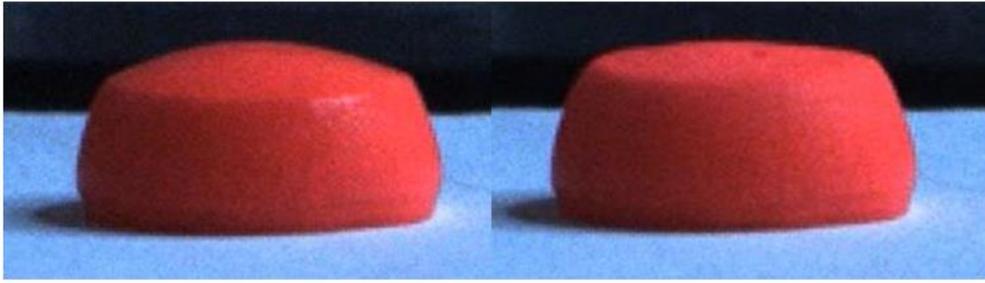


Рисунок 5. Кристаллизация нанокolloида (97% вода + 3% краситель)

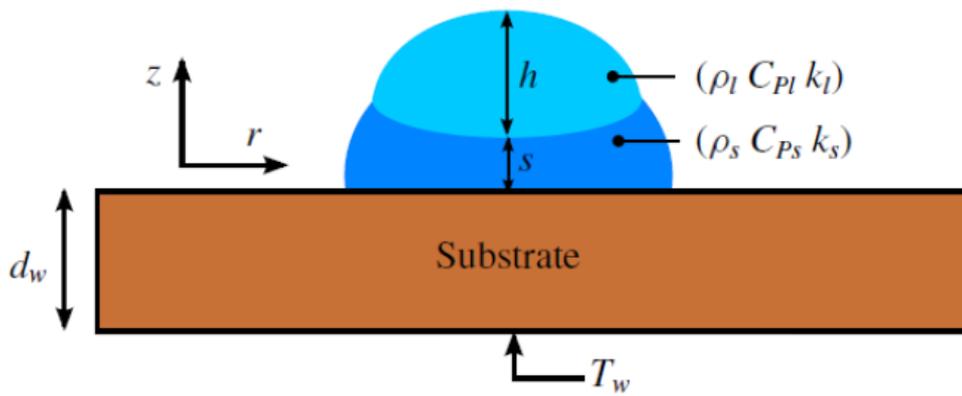


Рисунок 6. Геометрическая модель замерзания капли на подложке

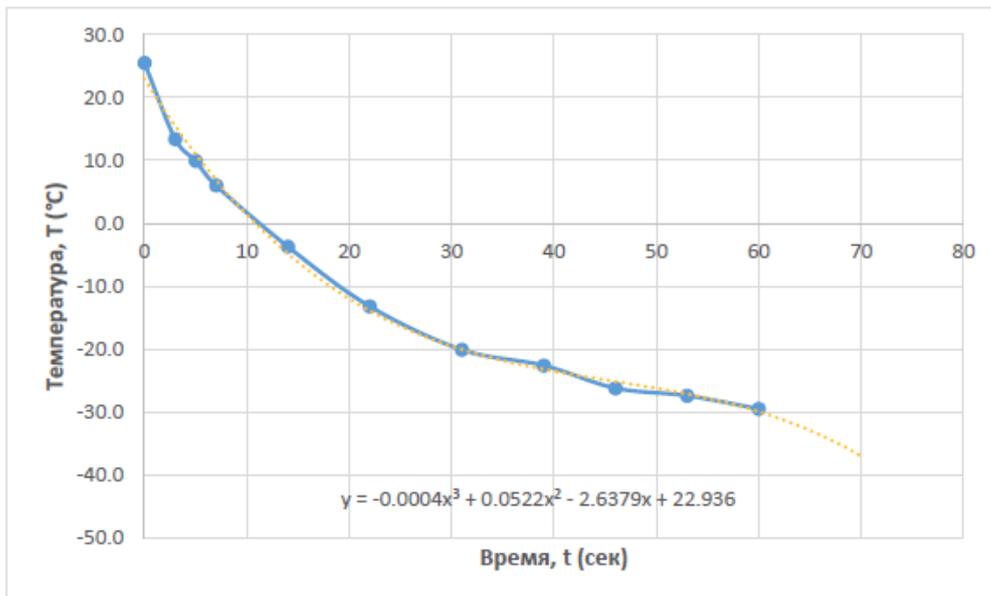


Рисунок 7. График зависимости температуры охлаждения от времени

Студент: Клочко Н.О.

Научный руководитель: д.т.н. Бухаров А.В.

Работа посвящена некоторым проблемам использования криогенных капельных потоков (криогенные корпускулярные мишени) в научных исследованиях и технологических процессах связанных с взаимодействием вещества с высокоэнергетическими излучениями.

Одной из самых перспективной современной технологией является так называемая монодисперсная технология (МДТ). МДТ – это такая технология, в которой в качестве рабочего тела используются монодисперсные сферических частиц субмиллиметровых размеров из различных материалов, обладающие минимальным разбросом по размеру и скорости. Благодаря МДТ появляются новые возможности для создания совершенно новых материалов с заранее заданными или, наоборот, совершенно уникальными свойствами. Несмотря на большое количество возможных вариантов МДТ технологий наиболее интересным вариантом является использование монодисперсных криогенных капельных потоков (криогенные корпускулярные мишени) в научных исследованиях и технологических процессах связанных с взаимодействием вещества с высокоэнергетическими излучениями. Принцип работы криогенной корпускулярной мишени состоит в следующем. Струя жидкого криоагента вытекает из генератора монодисперсных капель в вакуумную камеру. Под действием специального возмущения струя распадается на капли. Поскольку давление в

вакуумной камере ниже, чем давление около поверхности капель, происходит интенсивное испарение жидкости. Струя жидкости и капли охлаждаются, и в конце концов капли замерзают. Замерзшие криогенные гранулы через систему шлюзов поступают в область взаимодействия с высокоэнергетическим излучением. Использование криогенной корпускулярной мишени в качестве элемента лазерных технологий позволит: изучать вещество в экстремальном состоянии; создавать компактные ускорители заряженных частиц (электронов, протонов и тяжёлых ионов); даст возможность производить изотопы и разрабатывать новые методы в ядерной медицине; создавать новые источники излучения для микро и нанoeлектроники.

По результатам расчётов сделаны следующие выводы:

1. При движении капельного потока в среде с низким давлением на температуру капель существенное влияние оказывают следующие параметры: скорость потока, размер капель и внешнее давление.
2. Процесс замерзания не происходит мгновенно. Даже капли малого размера, двигающиеся в среде с очень низким давлением, замерзают не сразу, а остаются жидкими некоторое время.

Полученные результаты могут быть использованы при создании установок использующих криогенные корпускулярные мишени.

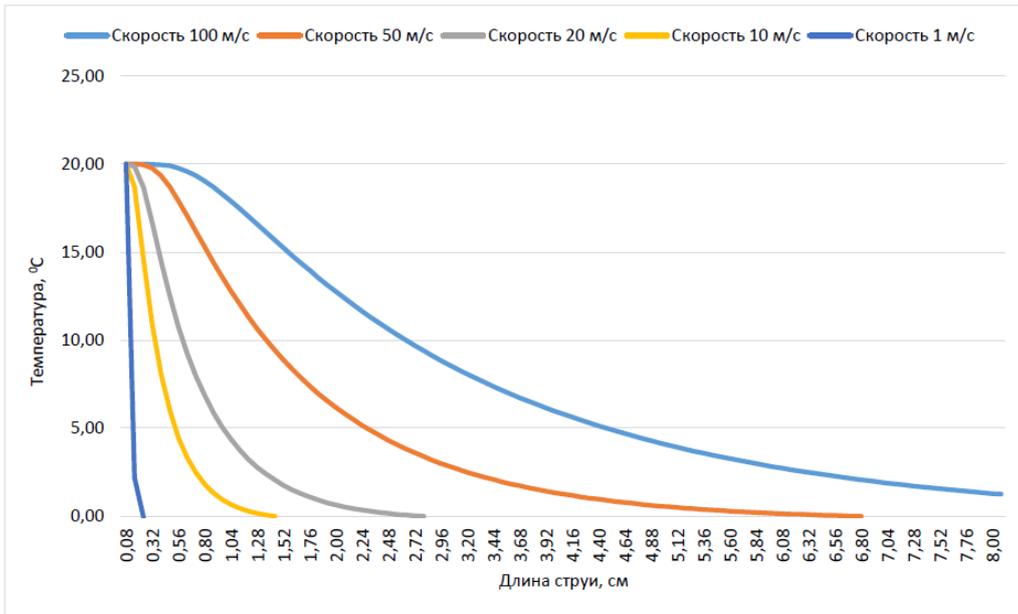


Рисунок 8. Графическое изображение момента полного замерзания струи при радиусе струи 10 мкм, давлении 600 Па.

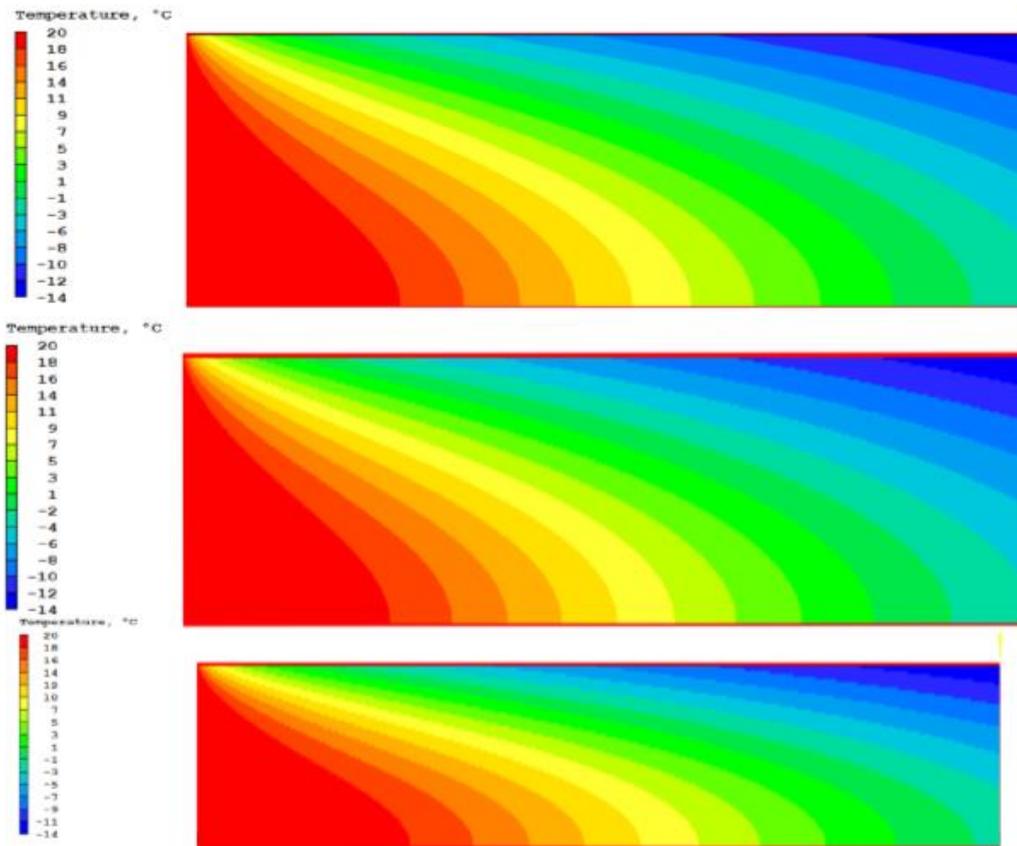


Рисунок 9. Графическое распределение температуры при радиусе струи 20 мкм, давлении 1 Па при разных скоростях.

Неравновесные эффекты при кипении He-II.
Применение кинетического уравнения Больцмана

Студент: Корняков И.А.

Научный руководитель: д.т.н. Крюков А.П.

Ныне известно, что гелий занимает второе место по распространённости во вселенной после водорода. Однако его физические свойства являются более интересными для учёных. Гелий в жидкой форме имеет самую низкую температуру кипения, а именно 4,2 К. Однако самое интересное явление переход обычного жидкого гелия в сверхтекучее состояние. Это фазовое состояние гелия было названо He-II. При переходе через λ -точку, что находится при температуре 2,17 К, He-II лишается вязкости и протекает через самые мелкие поры и каналы малых диаметров. Само явление сверхтекучести позволяет создать условия для эффективного охлаждения. Более того, теоретические исследования свойств требуют подтверждения оных в лабораторных экспериментах. Исследование кипения, которое было проведено для этой работы, является одним из необходимых этапов в познании природы и характерных особенностей данной фазы He-II. Уникальность данных опытов состоит в том, что в них возможно пренебрегать термическим сопротивлением из-за высокой эффективности теплопереноса. Практических применений у сверхтекучего He-II огромное множество от охлаждения магнитов в аппаратах для магниторезонансной томографии для достижения сверхпроводимости до космической отрасли, в которой сверхтекучий гелий помогает решить ряд проблем с захолаживанием систем. Общий принцип описания процесса теплопереноса в системе

пар – жидкость основывается на имплементации законов сохранения массы, импульса и энергии, и выполнении условия совместности на границе раздела фаз. Решение кинетического уравнения Больцмана традиционно считается очень трудной задачей. По этой причине его редко используют при анализе практических инженерных проблем.

На кафедре низких температур НИУ «МЭИ» научная группа ведёт исследования процессов теплопереноса при кипении сверхтекучего гелия и проводит эксперименты. Эксперименты проводились в стеснённых условиях и в свободном объёме. Особое внимание обращается на межфазную поверхность (именуемую далее паровой плёнкой) He-II в стеснённых условиях. Было проведено исследование разных материалов.

К моменту проведения нового эксперимента была проведена существенная работа над модернизацией экспериментального стенда. Также был собран новый нагреватель для исследования кипения He-II в свободном объёме на нагревателе, изготовленным из сплава хрома, алюминия и железа (фехраль).

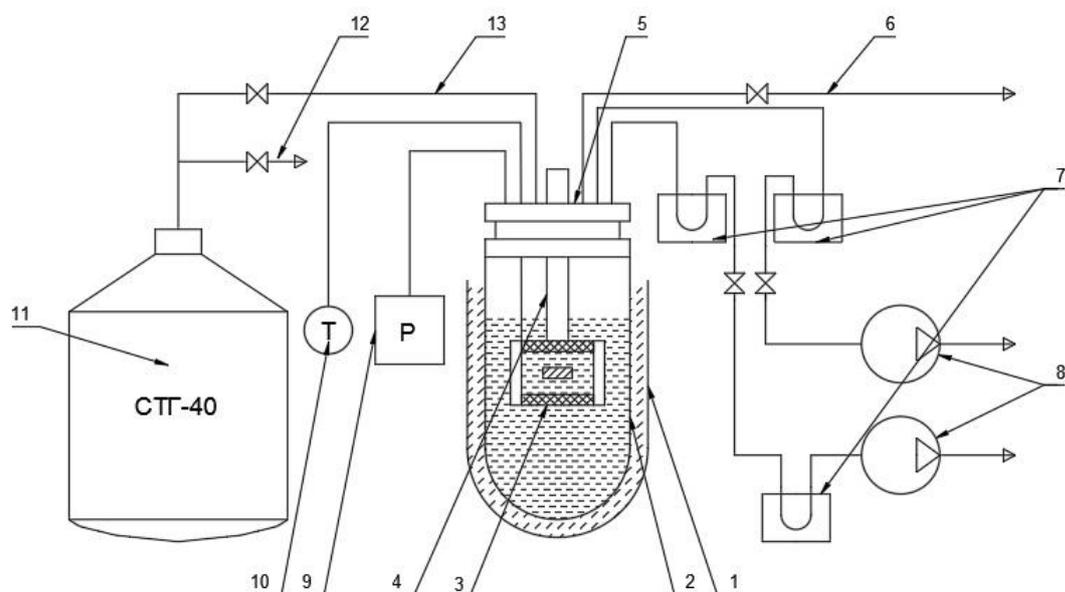


Рисунок 10. Схема экспериментальной установки: 1 – внешний сосуд Дьюара, 2 – внутренний сосуд Дьюара, 3 – экспериментальная ячейка, 4 – шток, 5 – капка, 6 – линия экстренного сброса давления, 7 – азотная ловушка, 8 – вакуумный насос, 9 – баратрон, 10 – термодатчики, 11 – СТГ-40 для переливания гелия, 12 – линия вытравливания лишних паров гелия из СТГ-40, 13 – линия перелива жидкого гелия из СТГ-40 в экспериментальный объём.

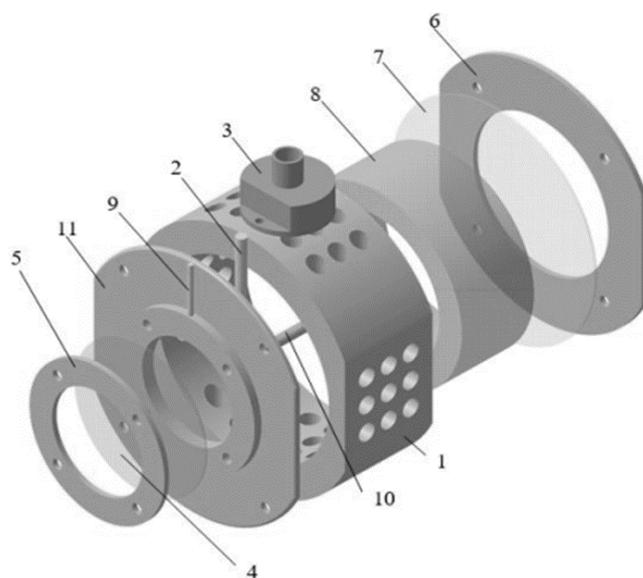


Рисунок 11. Схематичная сборка экспериментальной ячейки: 1 – корпус, 2 – держатель нагревателя, 3 – патрубок с уплотнением в отверстии для держателя нагревателя, 4 – стекло заднего смотрового окна, 5 – крышка, фиксирующая стекло, 6 – передняя крышка, 7 – стекло переднего смотрового окна, 8 – пористая оболочка, 9 – полный металлический шток, 10 – нагреватель, 11 – задняя крышка.

Студент: Ли Р.А.

Научный руководитель: д.т.н. Дмитриев А.С.

Целью работы является исследование процессов замораживания капель воды с добавлением в них красителя, оксида титана (TiO_2) и сажи различных концентраций, определение особенностей процессов, наблюдение за изменением морфологии капли в процессе кристаллизации.

Актуальность исследований: замораживание переохлажденной капли воды представляет собой сложный процесс, представляющий собой фазовый переход лед-вода. Замораживание часто встречается в областях холодильной техники, аэрокосмической и метеорологической. Обледенение в аэрокосмической промышленности наиболее актуальная и опасная проблема на сегодняшний день. Образование льда на разных частях самолета, в естественных условиях, усложняет управляемость и увеличивает сопротивление. Совокупность данных факторов может даже привести к аварийным случаям. В метеорологии одной из наиболее опасных проблем является град, скорость образования которого также высока как и ущерб, который он наносит. Обледенение проводов электропередач в регионах с высокой влажностью и низкими температурами приводит к таким последствиям как их обрыв.

Для лучшего прогнозирования образования льда и более четкого понимания замораживания капель воды ведется исследование данного процесса. Добавление красителя, сажи и TiO_2 может дать новое представление об

изменении морфологии капли при замерзании капли.

В ходе работы проводились исследования свойств замороженных капель воды с добавлением красителя, оксида титана TiO_2 и сажи различной концентрации при помощи растворов с дистиллированной водой

В результате проведенных опытов удалось экспериментально установить, что при увеличении концентрации красителя и оксида титана в воде, время замораживания капли заметно сокращается. А при увеличении концентрации сажи наоборот увеличивается.

Была изучена морфология капли для всех растворов. Во всех экспериментах отсутствовал остроконечный конус при полной заморозки капли. Однако при замораживании всех растворов появлялось «плато» при определенной концентрации коллоида.

Были построены графики зависимости времени замерзания от концентрации коллоида и растворе

Сравнение результатов замораживания всех экспериментальных образцов

Выявлено влияние тепломассопереноса на скорость кристаллизации отдельно взятой капли воды.

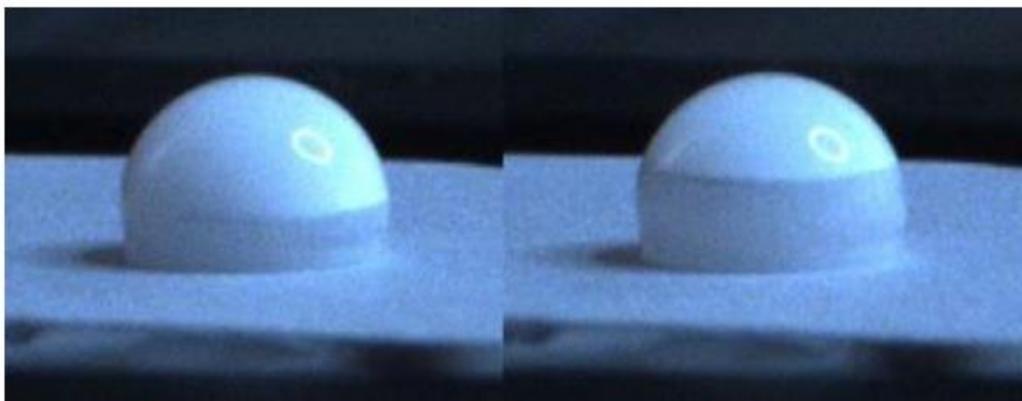


Рисунок 12. Движение фронта кристаллизации спустя 35 и 70 секунд после начала эксперимента.

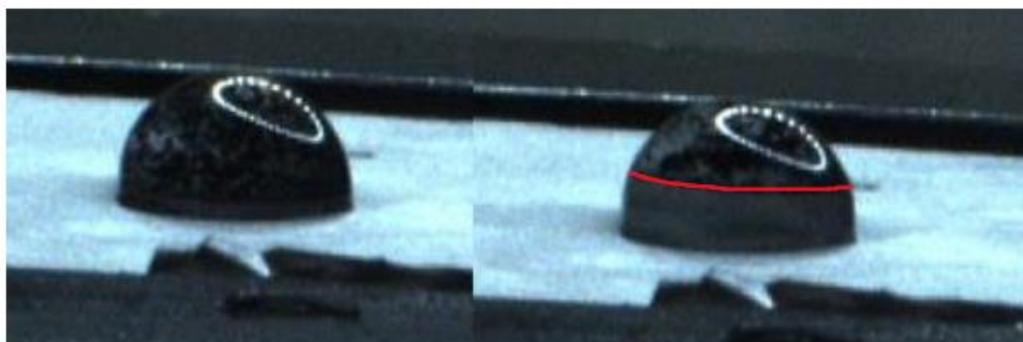


Рисунок 13. Движение фронта кристаллизации спустя 15 и 30 секунд после начала эксперимента.

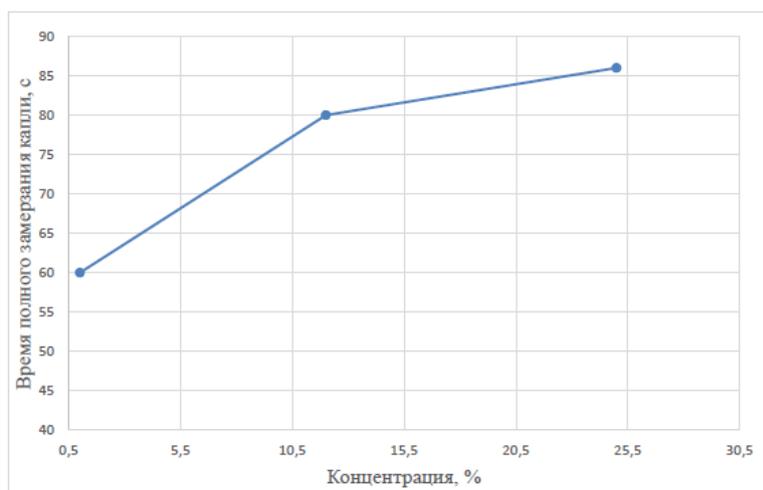


Рисунок 14. График зависимости времени полного замораживания капли от концентрации сажи в растворе

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Термические метаматериалы: графеновые материалы в постоянном магнитном поле и их температурные поля

Студент: Акулов А.М.

Научный руководитель: д.т.н. Дмитриев А.С.

Цель моей работы изучить поведение температурного поля графена в магнитном поле. Тема достаточно новая, в открытых источниках практически нет информации, только зарубежные статьи. Были изучены несколько литературных источников, в том числе несколько экспериментов, на которые в ходе работы было необходимо опираться. Выпускная квалификационная работа является экспериментом, поэтому математическое описание приводится только в теоретической части для большего понимания о метаматериалах. Практический результат эксперимента на таких ранних порах трудно оценить, однако теоретически результаты могут лечь в основу создания устройств, в которых с помощью магнитного поля можно будет управлять направлением теплового потока.

Многообразие химических и физических свойств обусловлено кристаллической структурой π -электронами атомов углерода, составляющих графен. Широкое изучение материала в университетах и исследовательских лабораториях связано, прежде всего, с доступностью и простотой его приготовления с использованием механического расщепления кристаллов графита. Графеном, который имеет высокую проводимость, теплопроводность и прочность заинтересовались так же

всемирно известные корпорации, такие как IBM и Samsung, чтобы усовершенствовать производство процессоров. Транзисторы из графена заметно превосходят обычные кремниевые транзисторы, потому что у графена есть запрещенная зона нулевой ширины. Так же в графеновом канале ток течет при любом затворном напряжении. Именно поэтому сейчас происходят изменения в подходах создания транзисторов. Год от года количество публикаций растет. В 2012 году их число превысило 10000. По данным на июль 2020 года количество публикаций находится на отметке около 320.5 тысяч. Наиболее активными стали исследователи из Китая, выпустив на июль 2020г 34% всех статей (109 тысяч).

В планах получить более качественные изображения температурных полей. Для этого буду использовать суспензию хлопьев графена и более мощные магниты, чтобы карта режимов была более выразительной. Так же планируется использовать больше плоскостей движение магнита.

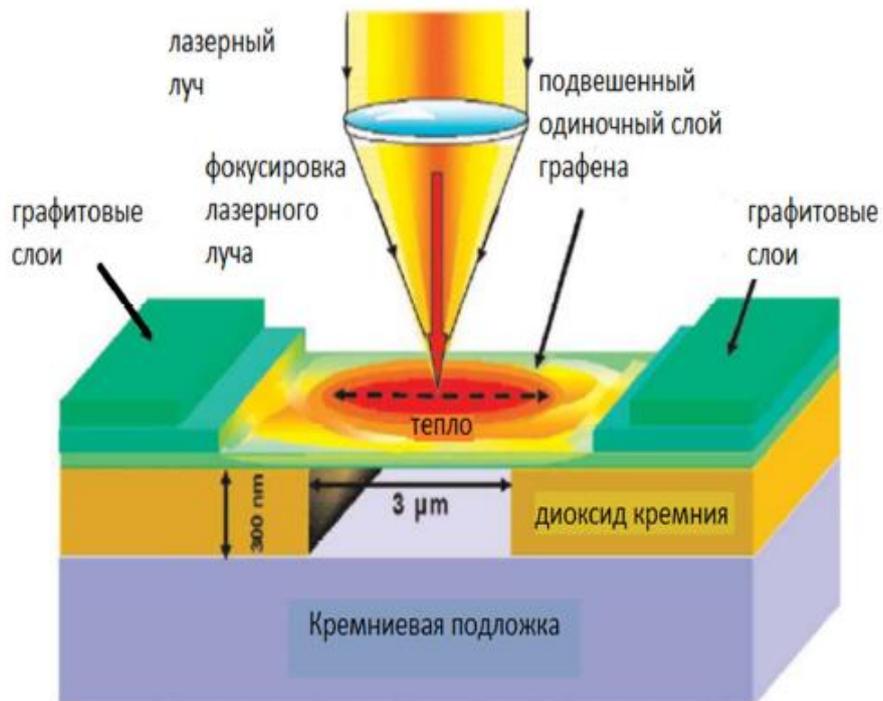


Рисунок 15. Схема подвешенного графена для экспериментального измерения с помощью бесконтактной оптической техники

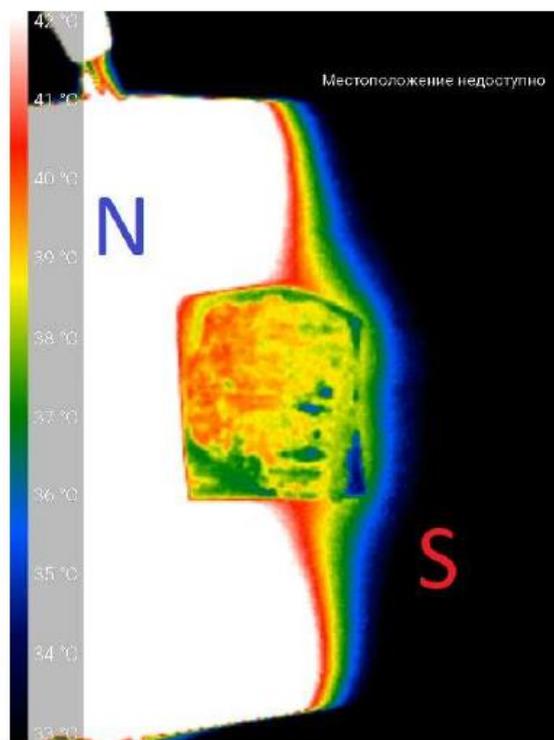


Рисунок 16. Распределение температур

Студент: Бурносов М. А.

Научный руководитель: к.т.н. Михайлова И. А.

Графен – это материал, который по мимо хороших механических и электрических свойств, обладает превосходными тепловыми свойствами. Исследование данного материала возобновило интерес к теме смачивания материалов на основе графита. Хотя долгое время считалось, что графен и графит гидрофобны, недавние исследования опровергли данное мнение.

Цель квалификационной бакалаврской работы заключается в получении нанокомпозитов на основе графеновых нанохлопьев и в определении и анализе следующих параметров: смачивание и растекание, темп испарения и кипения, а также проанализировать разрушение полученных образцов, запрессованных при разном давлении. Тема является достаточно новой, в открытых источниках по ней практически нет информации, только работы преимущественно зарубежных учёных. Особенностью данной работы является проведение анализа темпа испарения и процессов смачивания-растекания на идентичных образцах, с различным давлением запрессовки, а также исследование характеров разрушений.

В экспериментальной части квалификационной работы созданы три образца на основе графеновых нанохлопьев, запрессованных при разных величинах давления. Поверхности образцов исследовали сразу после получения.

В квалификационной работе решены следующие задачи:

изучены зарубежные и российские публикации по тематике графеновых нанокомпозитов; получены три серии образцов, диаметром 2,5 см и высотой 2 мм на основе графеновых нанохлопьев, при разных величинах давления прессования, определены скорости испарения капли воды и краевых углов смачивания: образцы, запрессованные при давлении 300 бар, показали высокую скорость испарения при температурах выше 100 °С в сравнении с образцами, полученными при меньшем давлении. Было сделано предположение, что на температурах до 100 °С образец K100 способен впитывать воду. изучены процессы разрушения поверхности графеновых таблеток, при нагревании до температуры 170 °С и воздействии каплей воды объёмом 5 мкл. В этих экспериментах получено, что давление запрессовки влияет на разрушаемость. Были получены фото микроскопии поверхностей, на которых наглядно видна зависимость от давления запрессовки, с увеличением давления запрессовки растёт и прочность поверхностного слоя образцов. получены зависимости времени испарения от температуры, краевого угла смачивания от времени испарения капли жидкости, наглядно продемонстрирована зависимость угла смачивания от времени в начальный момент, после падения капли на образец. Из этих данных было выяснено, что при росте давления запрессовки уменьшается значение контактного угла смачивания.

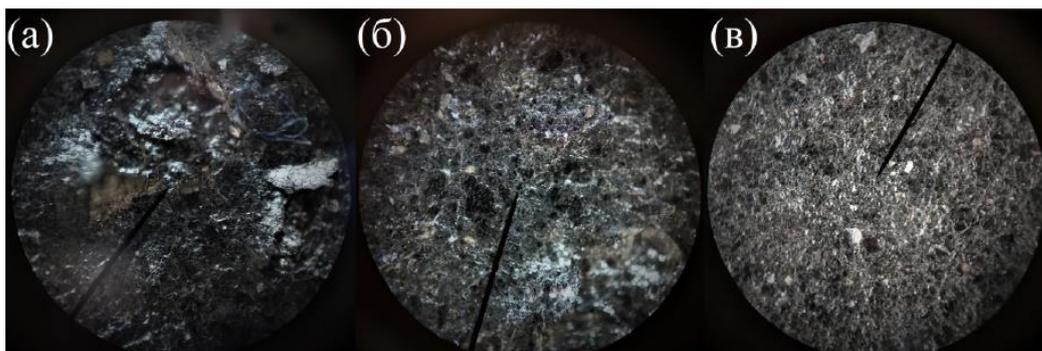


Рисунок 17. Образцы K100 (а), L200 (б), A300 (в), после эксперимента на разрушение, приближение X8

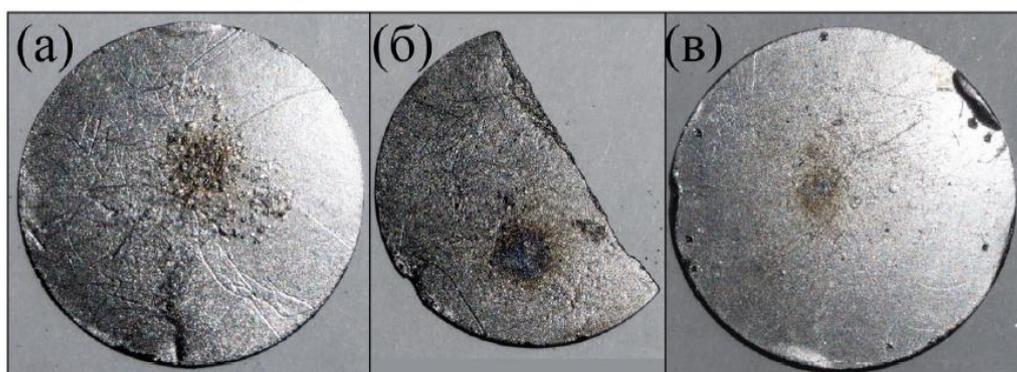


Рисунок 18. Образцы K100 (а), L200 (б), A300 (в), после эксперимента на разрушение

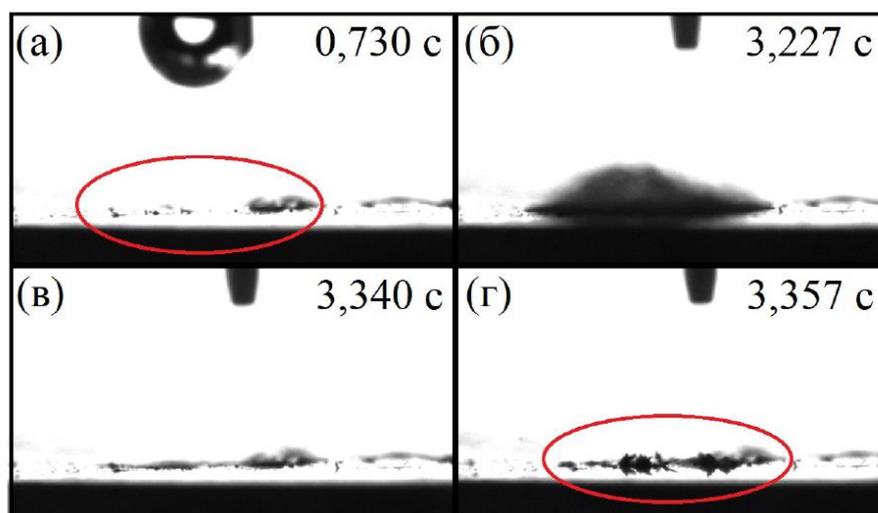


Рисунок 19. Процесс испарения капли с образца L100, температура 180 °C, кадры отличаются по времени, указанному в правом верхнем углу, значение указывает на время с момента начала записи видео

Исследование поведения капель различных жидкостей при эффекте Лейденфроста

Студент: Голованов Т.А.

Научный руководитель: к.т.н. Макаров П.Г.

Целью работы является исследование поведения капель различных жидкостей на сильно перегретых струнах. Чтобы ее достигнуть необходимо рассмотреть и решить следующие задачи: поиск и ознакомление с монографиями, трактатами и статьями российских и зарубежных авторов, которые посвящены исследованию эффекта Лейденфроста;

получить данные по статистике явлений, возникающих при контакте капель различных жидкостей с различными типами неоднородной поверхности и различных температурах; обработать и сравнить полученные данные.

сформулировать предложения по прикладному применению исследований.

Актуальность данной работы связана с наблюдением в последние годы всплеска роста заинтересованности учеными вопросами взаимодействия сильно перегретых поверхностей с жидкостями. Большую роль сыграло появление высоко чувствительных камер со скоростью съемки несколько сотен тысяч кадров в секунду, и развитие технологий струйной печати и охлаждения. Помимо вышесказанного контактирование жидкостей с перегретыми поверхностями является одной из проблем теплофизики ядерных реакторов. Как известно, одной из важнейших проблем современной атомной энергетики является обеспечение эксплуатационной безопасности действующих и проектируемых АЭС. История неопровержимо свидетельствует о

том, что именно недостаток знаний в области теплообмена на поверхности ТВЭЛ и гидродинамики реакторных каналов в большинстве случаев является наиболее частой причиной возникновения и развития тяжелых аварий. Не является исключением и Чернобыльская катастрофа. Также при выполнении определенных условий может произойти такое опасное явление как паровой взрыв.

Было проведено исследование эффекта Лейденфроста на неоднородных поверхностях различных конфигураций для трех типов жидкостей: вода; глицерин; раствор воды и глицерина в концентрациях 1:1;

И получены соответствующие зависимости времени жизни капли от температуры поверхности из которых следовало: дольше всех удерживались капли воды, а минимальное среднее время показал глицерин.

В двух случаях обмотки из трех наибольшая температура начала наблюдения эффекта Лейденфроста у глицерина. Затем вода, самая низкая - у смеси. Более того, всегда температура наблюдения искомого явления левитации выше, чем температура Лейденфроста для этих жидкостей из справочников, что говорит, вероятно, о большой роли специфического рельефа. Воспроизведены такие явления как: самовозгорание, выпрыгивание, взрыв капли.



Рисунок 20. Выкипание капли глицерина

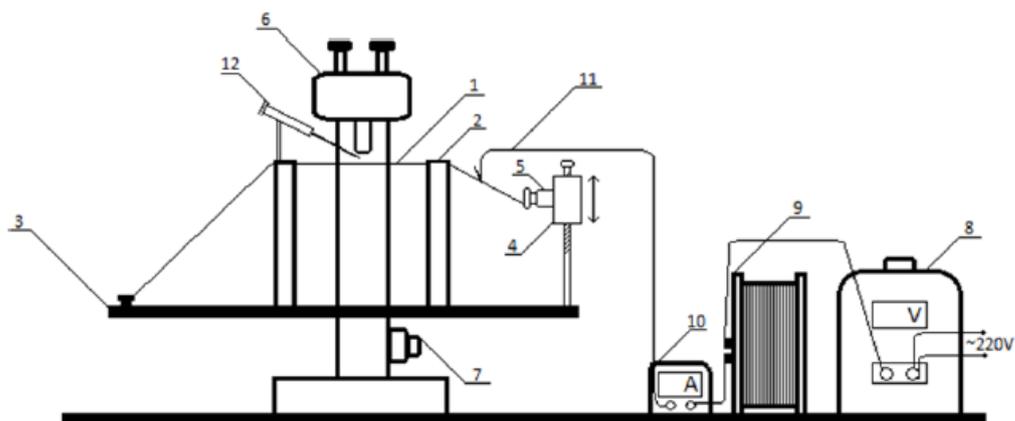


Рисунок 21. Схема установки

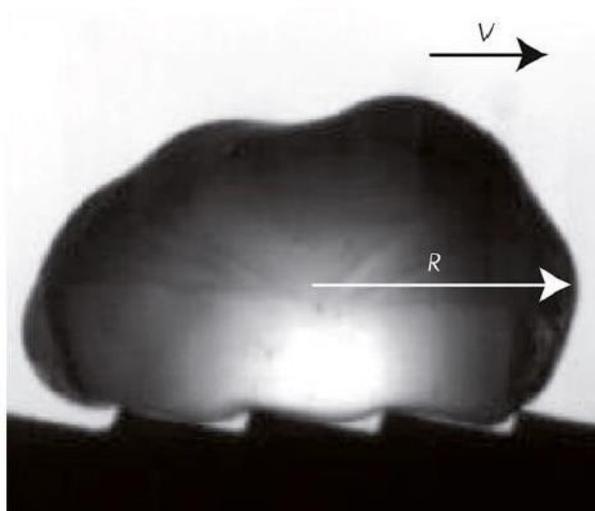


Рисунок 22. Капля этанола, находящаяся на горячей латунной подложке, под действием эффекта Лейденфроста движется в направлении, указанном стрелкой в верхнем правом углу

Численное моделирование объемной конденсации в сверхзвуковом парогазовом потоке с учетом межфазного теплообмена

Студент: Ляукин А.В.

Научный руководитель: к.т.н. Ястребов А.К.

Конденсация – переход вещества из жидкого состояния в газообразное или твёрдое (возможно в случае давления паров ниже давления в тройной точке при пониженной температуре). По месту образования жидкости процесс конденсации можно разделить на две группы: 1) Непосредственно в объёме пара. 2) На поверхности твёрдого тела. Объёмная конденсация происходит только при наличии центров кристаллизации. Такими центрами являются центры зародыши новой фазы, которые образуются в произвольном порядке из пересыщенного пара. В качестве центров конденсации являются пылинки, жидкие или твёрдые частицы ранее сконденсировавшегося вещества или ионы. Гомогенная конденсация происходит при большей степени пересыщения водяного пара, по сравнению с гетерогенной конденсацией, когда в атмосфере находятся активные ядра каплеобразования. В атмосфере концентрация активных центров незначительна, поэтому осадкообразование происходит лишь при достаточном пересыщении. Каплеобразование в этом случае происходит по следующему механизму: в локальных областях пересыщенного пара с повышенной концентрацией молекул образуются малые молекулярные кластеры – зародыши, на которых в дальнейшем конденсируется пар и образуется капля.

В процессе объемной конденсации тепловыделение приводит к повышению температуры как газообразной

формы, так и жидкой. Из-за этого процесс конденсации замедляется по двум причинам. Во-первых, если увеличить температуру пара (вследствие межфазного теплообмена) уменьшается степень его пересыщения и скорость нуклеации. Во-вторых, если увеличить температуры капель, то снижается скорость их роста, которая обусловливается разностью давления пара и давления насыщения при температуре капель.

В работе была использована программа для расчёта одномерного стационарного течения парогазовой смеси в сверхзвуковой части сопла. Расчёты были проведены для смеси водяного пара при различных начальных условиях. Были проанализированы зависимости температур капель, степень пересыщения, количество капель в единицы массы, массовая доля жидкости, температура газообразной фазы. Если снижать давление газа, то результаты в которой мы учитывали предельность скорости теплообмена, то данные схожи с данными при случае, когда температура капель, равна температуре насыщения. А если увеличивается содержание газа в смеси, то получаем результаты похожие на данные для однотемпературной модели.

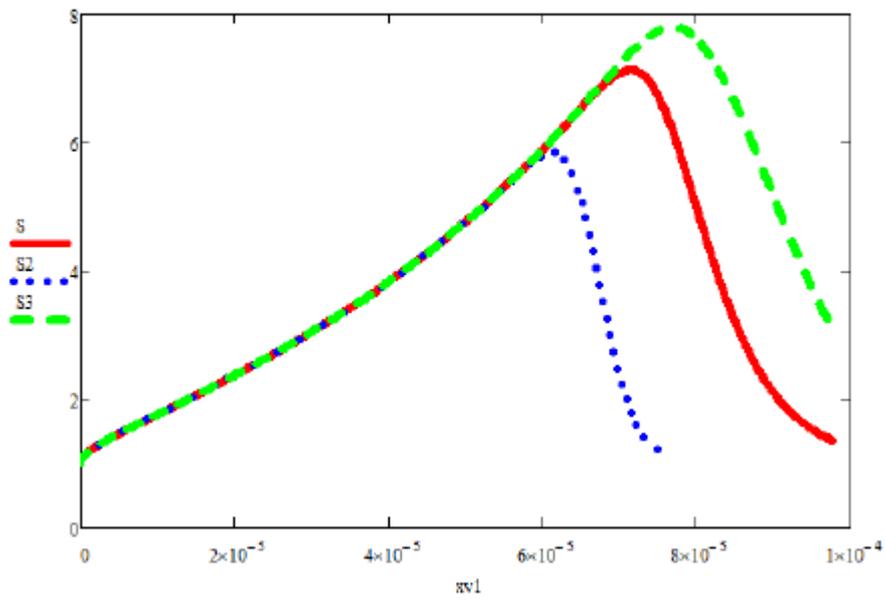


Рисунок 23. Степень пересыщения. S – с учётом межфазного теплообмена, $S2$ – однотемпературная модель, $S3$ – модель, когда температура капель равна температуре насыщения.

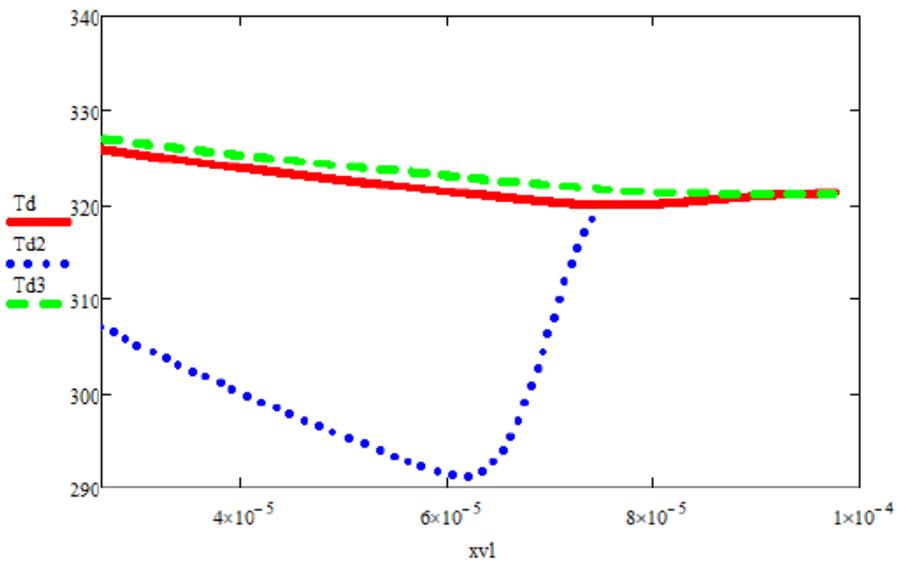


Рисунок 24. Зависимость температуры капель для трёх разных моделей. Td – с учётом межфазного теплообмена, $Td2$ – однотемпературная модель, $Td3$ – модель, когда температура капель равна температуре насыщения.

Интерпретация новых экспериментальных данных по кипению сверхтекучего гелия на поверхности цилиндрического нагревателя в стесненных условиях.

Студент: Монахова С.П.

Научный руководитель: к.т.н. Королёв П.В.

В работе предпринята попытка интерпретации имеющихся экспериментальных данных по кипению гелия-II в стесненных условиях. Выполнены расчеты толщины паровой пленки на базе имеющихся моделей пленочного кипения сверхтекучего гелия на поверхности цилиндрического нагревателя в полости внутри пористой оболочки. Показана непригодность существующих моделей, и сформулирована новая модель стационарного бесшумового пленочного кипения сверхтекучего гелия на цилиндрической греющей поверхности в полости внутри пористой структуры. Модель учитывает специфику двухскоростной гидродинамики при формулировке граничных условий на межфазной поверхности пар-жидкость, поскольку за основу взята модель С.К. Немировского. Кроме того, новая модель базируется на нелинейном законе фильтрации, т.е. учтена нелинейная зависимость скорости фильтрации нормального компонента гелия-II от градиента давления в пористой оболочке.

Выполненные по разным моделям расчеты толщины паровой пленки при кипении сверхтекучего гелия на поверхности цилиндрического нагревателя в полости внутри пористой структуры показали, что для всех режимных параметров рассмотренного эксперимента расчетные значения не совпадают с экспериментальными.

Сформулированная новая модель стационарного бесшумового пленочного кипения сверхтекучего гелия на

цилиндрической греющей поверхности, учитывающая специфику двухскоростной гидродинамики при формулировке граничных условий на межфазной поверхности пар-жидкость и нелинейную зависимость скорости фильтрации от градиента давления в пористой среде, также не дает правильных результатов. Этот факт, видимо, можно объяснить тем, что во всех сериях эксперимента наблюдалось очень неустойчивое «почти бесшумовое» пленочное кипение с переходом к шумовому режиму кипения. При этом кратковременное шумовое пленочное кипение всякий раз заканчивалось тем, что замкнутая паровая пленка с неустойчивыми очертаниями «раскрывалась» и имел место режим кипения «с незамкнутой паровой пленкой», т.е. происходил срыв «обычного» шумового пленочного кипения He-II. «Обычное» шумовое пленочное кипение с замкнутой пленкой никогда не было длительным, следовательно, и при «обычном» шумовом кипении происходили процессы, предшествующие «раскрытию» пленки, так что осредненная толщина ее (вопреки нашим первоначальным предположениям) определенно не может сопоставляться с расчетной толщиной, полученной на базе моделей бесшумового кипения.

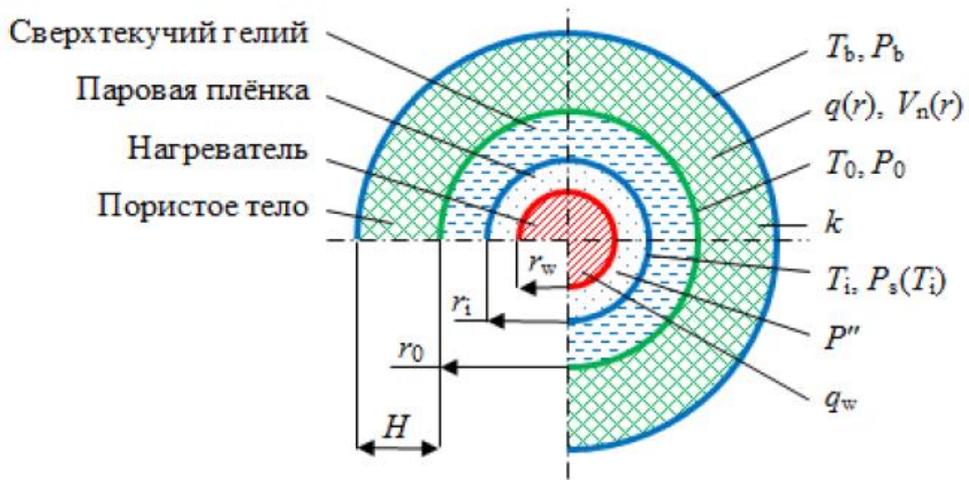


Рисунок 25 Схематическое изображение физической модели

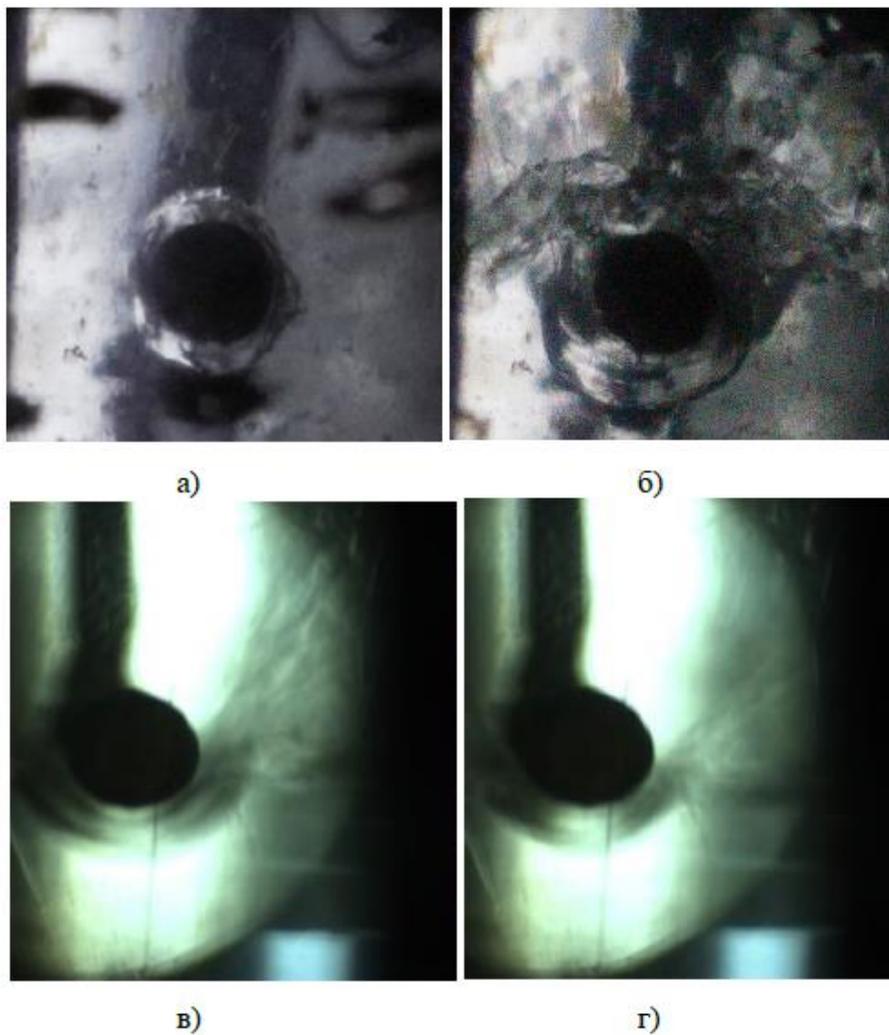


Рисунок 26 Фотоиллюстрация шумового пленочного кипения (а) и кипения с незамкнутой паровой пленкой (б, в, г)

Изучение физико-технических характеристик гальванических микроструктур методом зондовой микроскопии

Студент: Новиков М.М.

Научный руководитель: к.т.н. Михайлова И.А.

Микроэлектромеханические системы – устройства, объединяющие микроэлектронные и микромеханические компоненты К МЭМС относят системы, размеры которых лежат в пределах от долей микрометра до одного миллиметра. Важно, что существует совместимость технологии микросистемной техники с технологией микроэлектроники. Для изготовления МЭМС применяются те же технологии, что и для изготовления традиционных интегральных микросхем (фотолитография, травление, гальваника, вакуумное напыление и т.д.), дополняя последние механическими элементами, такими как балки, мембраны и т.д.

Цель выпускной квалификационной работы – выполнение серии экспериментов на образцах полосковой золотой контактной линии МЭМС, полученных в нескольких гальванических режимах осаждения, и определение физико-механических характеристик микроструктур за счет многоциклового нагружения и разгрузки.

В квалифицированной работе бакалавра решены следующие задачи:

1. Проведен анализ конструкций и принципов функционирования МЭМС устройств, выявлен механизм циклического срабатывания емкостного преобразователя, заставляющего подвижный элемент замыкать управляющий электрод под действием управляющего электрического напряжения и возвращаться в исходное разомкнутое состояние после снятия управляющего напряжения.

2. Изучены принципы атомно-силовой микроскопии: рассмотрены основы физической модели, описывающие взаимодействие атомов зонда кантилеверов АСМ и исследуемой поверхности: ван-дер-ваальсовы взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, аппроксимированное степенной функцией – потенциалом Леннарда-Джонса.

3. Изучены основы метода инструментального динамического индентирования, особенности конструкции и составные части скандирующих нанотвердомеров на примере установки «Наноскан 3D» (силовая ячейка, прецизионные датчики, пьезорезонансный кантилевер камертонной конструкции). Проведено сравнение методов определения твердости, среди которых выделен метод Оливера-Фарра как наиболее информативный. Рассмотрены параметры и физические свойства, описанные методом Оливера-Фарра, определение которых реализовано в методе инструментального динамического наноиндентирования; шероховатость поверхности и ее параметры; остаточные механические напряжения, пористость, ползучесть, энергетические характеристики процесса образования контактного отпечатка.

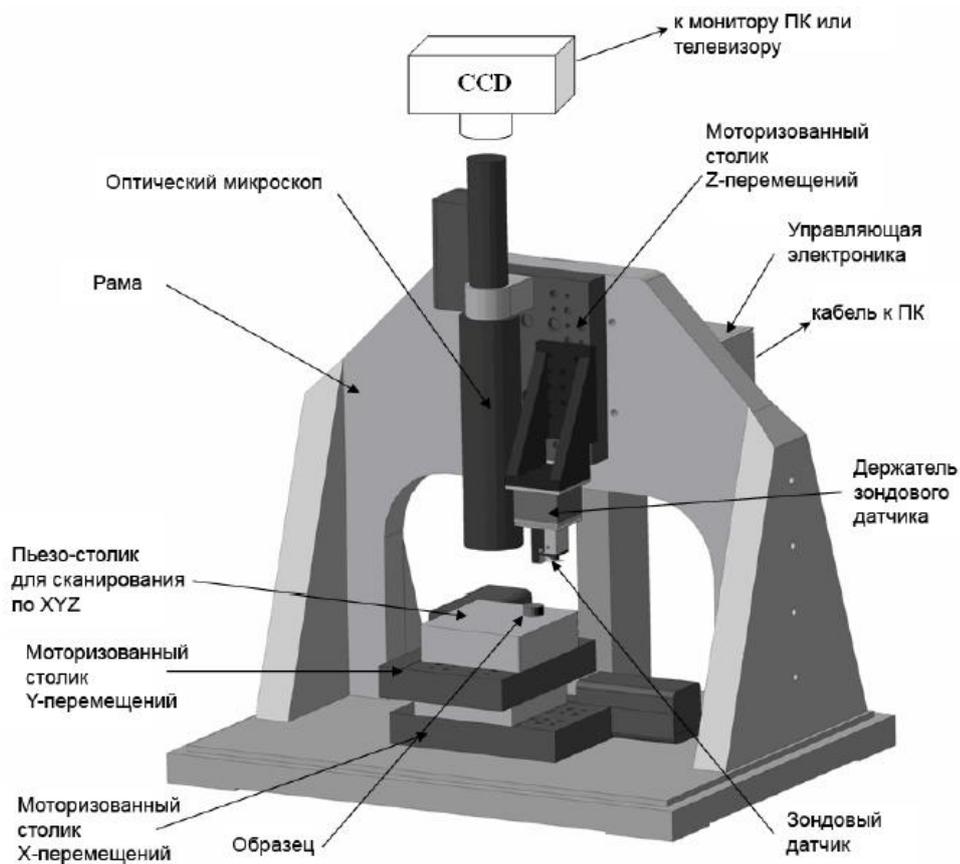


Рисунок 27 Общий вид сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D»

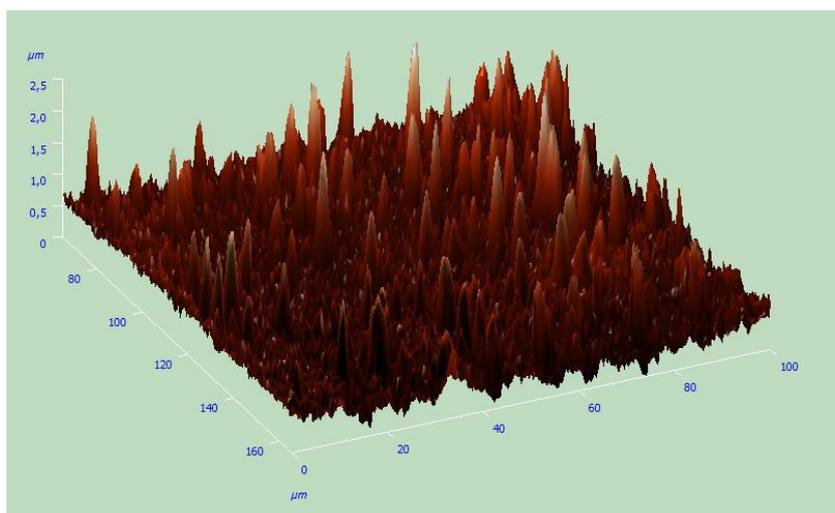


Рисунок 28. Действительный профиль второго образца золотой контактной линии