

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

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование процесса испарения капли с учетом наличия в ней твердой фазы

УДК 536.421.3:532.78–047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Аёшина Т.Н.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Борисов Б.В.	д.ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент/ ст. преподаватель	Попова С.Н.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Дашковский А.Г.	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 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	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.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	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.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	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>	
P7	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.
P8	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.
P9	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 Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

_____ Кузнецов Г.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группы	ФИО
5Б2Б	Аёшиной Татьяне Николаевне

Тема работы:

Исследование процесса испарения капли с учетом наличия в ней твердой фазы

Утверждена приказом ректора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

16 июня 2016 г.

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.).

Объект исследования – капля воды с твёрдой фазой (поваренная соль NaCl). Требования к продукту – физическая и математическая модель процесса диффузии в капле при ее испарении. Исходные данные: теплофизические параметры объекта.

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>	Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения информации в рассматриваемой области. Математическое и численное моделирование теплопереноса в капле. Исследования влияния параметров процесса на динамику изменения толщины плёнки. Обсуждение результатов исследования. Формулировка выводов и заключения.
--	---

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Кол-во слайдов:
--	------------------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>

Раздел	Консультант
Основной раздел	Борисов Б.В.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова С.Н.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.

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

Введение, обзор литературы, объект и метод решения, результаты, заключение (русский)

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

Задание выдал руководитель:				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Борисов Б.В.	д.ф. – м.н.		10.04.2016 г.

Задание принял к исполнению студент:			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Аёшина Т.Н.		10.04.2016 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 65 с., 25 рис., 12 таблиц, 22 источника.

Ключевые слова: капля, испарение, диффузия, массовая доля, корреляция, скорость, зависимость.

Объектом исследования является (ются) сферическая капля, летящая в потоке.

Цель работы – моделирование процесса диффузии и теплопроводности в капле с твердыми включениями с учетом испарения.

В процессе исследования проводились численные исследования диффузии при различных режимах испарения.

В результате исследования разработана математическая модель, проведена численная реализация процессов теплопереноса в капле с твёрдыми включениями, проанализирована зависимость параметров на протекание процесса.

Степень внедрения: пробная эксплуатация предварительных расчетов.

Область применения: распылительная сушка, испарительное охлаждение, сжигание углеводородного топлива, работа газотурбинных генераторов.

Экономическая эффективность/значимость работы интенсификация процессов, выбор оптимальных режимов работы.

В будущем планируется экспериментальная проверка полученных результатов, на её основе, разработка оборудования.

Оглавление

Введение.....	Ошибка! Закладка не определена.
1 История задачи об испарении. Физические модели взаимодействия капли с потоком. Методы решения.	Ошибка! Закладка не определена.
2 Моделирование высыхания капли жидкости с учетом диффузии твёрдой фазы в виде растворенной соли или других мелкодисперсных частиц.	Ошибка! Закладка не определена.
Физическая постановка	Ошибка! Закладка не определена.
Математическая постановка	Ошибка! Закладка не определена.
Численная реализация модели	Ошибка! Закладка не определена.
3 Исследование влияния параметров процесса на динамику изменения толщины плёнки	Ошибка! Закладка не определена.
Проверка на внутреннюю сходимость...	Ошибка! Закладка не определена.
Зависимость $E\tau = fU$	Ошибка! Закладка не определена.
Зависимость $E\tau = f\kappa$	Ошибка! Закладка не определена.
Влияние вида уравнения коэффициента диффузии на распределение массовых долей.	Ошибка! Закладка не определена.
Анализ и обсуждение результатов	Ошибка! Закладка не определена.
4 Социальная ответственность	Ошибка! Закладка не определена.
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
Список использованной литературы.....	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

В последние несколько лет задача об испарении капель привлекла к себе значительное внимание в связи с новыми приложениями. Речь идёт о приготовлении ультрачистых поверхностей, о кристаллографии протеинов, об изучении растяжения молекул ДНК и о методе изображений ДНК, о развитии методов струйной печати [1]. Исследование гетерофазных мелкодисперсных сред, таких как аэрозоли, суспензии, представляют значительный интерес как с точки зрения развития новых технологий, так и с точки зрения изучения аномальных физических явлений. Во многих областях науки и техники, таких, как химия, медицина, физика атмосферы, теплотехника, энергетика используются капельные аэрозоли [2, 3]. Но прежде чем описывать процесс роста и испарения аэрозоля как коллектива частиц, необходимо выяснить, как проходит процесс испарения или роста единичной капли в заданных условиях внешней среды. В данной работе рассматривается задача об испарении капли с твердыми включениями, при этом проводится анализ роста и образования корки, учтена зависимость коэффициента диффузии от массовой доли растворенного вещества в капле.

Основной целью данной работы является исследование процесса диффузии в капле с твёрдыми включениями при испарении, влияния параметров на массовую долю раствора и толщину плёнки, а также анализ процесса образования и роста корки при испарении. Испарение капель диспергированной жидкости в газовых средах является базовой операцией во многих современных технологиях, таких, как распылительная сушка, испарительное охлаждение, сжигание углеводородного топлива, работа газотурбинных генераторов. В последние годы изучение закономерностей тепломассообмена капель жидкости с окружающей средой привлекает исследователей в плане научного обоснования методов интенсификации таких процессов и выбора оптимальных режимов.

1 История задачи об испарении. Физические модели взаимодействия капли с потоком. Методы решения.

Испарение единичной сферической капли в среде с заданными параметрами является классической задачей. Первым исследователем в области испарения капель в газообразной среде был Максвелл. Максвеллом был рассмотрен простейший случай испарения неподвижной капли. При использовании уравнений диффузии и непрерывности потока молекул была получена формула:

$$w(r) = -D \frac{\partial n}{\partial r}, \quad W = 4\pi r^2 w(r) = -4\pi D R^2 \frac{\partial n}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (1)$$

Максвелл получил известное выражение для потока испаряемых частиц от капли W :

$$W = 4\pi D R (n_R - n_0) \quad (2)$$

Здесь D – коэффициент диффузии молекул пара в окружающем газе, а n_R и n_0 – концентрации частиц вблизи поверхности капли и на бесконечности соответственно.

Максвелл полагал, что пар около поверхности капли всегда насыщен (концентрация пара у поверхности капли равна равновесной концентрации), но пар у поверхности будет насыщенным, только если скорость поступления молекул с поверхности капли достаточно велика по сравнению со скоростью их диффузионного ухода. В общем случае это не так. Также стоит отметить, что испарение приводит к отводу энергии от капли и должно сопровождаться понижением ее температуры относительно температуры окружающей среды. Это значит, что концентрация насыщенного пара вблизи поверхности будет определяться не заданной температурой окружающего газа, а неизвестной температурой капли. Неучёт только одной этой особенности процесса делает формулу Максвелла сильно приближённой.

В 1882 г. Герцем была опубликована классическая работа «К испарению жидкостей, в частности ртути, в вакууме». Была сделана попытка исключить диффузию в посторонний газ, как явление вторичное, и исследовать непосредственно скорость изменения фазы [4]. Он использовал несколько типов устройств, одно из которых показано на рис 1.

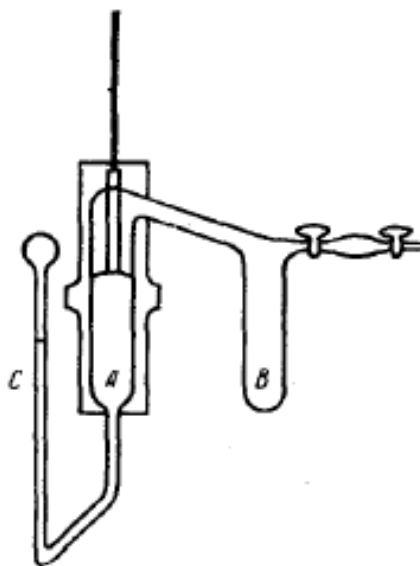


Рисунок 1 — Прибор Герца

Ртуть перегонялась из нагреваемого сосуда А в охлаждаемый конденсатор В. Температура перегонки выбиралась в пределах от 100 до 200 °С, что соответствует давлению паров от 0,2 до 20 мм. рт. ст. Прибор откачивался. Впаянный в А термометр касался мениска ртути; давление паров над поверхностью ртути измерялось при помощи манометра С. Скорость испарения при выпуклом мениске ртути оказалась в пределах от 0,08 до 1,67 мм/мин.

На основе опыта Герц пришёл к следующему достоверному выводу: для каждого вещества существует максимальная скорость испарения, которая зависит только от температуры поверхности и специфических свойств данного вещества. Максимальная скорость испарения никогда не может быть больше числа молекул пара, ударяющихся о поверхность конденсата в

состоянии равновесия. Следовательно, верхний предел для максимальной скорости испарения есть

$$i = \frac{v}{4} \cdot n_s, \left[\text{молекул} / \text{см}^2 \text{сек} \right] \quad (3)$$

где v [см/сек]—средняя арифметическая скорость молекулы, n_s – равновесная концентрация молекул пара [число молекул/см³].

В 1915 г. Кнудсен выполнил первые вполне надёжные измерения со ртутью. Пипетка А содержит ртуть при комнатной температуре. Для поддержания необходимой теплопередачи пипетка окружена медной рубашкой В. Ртуть стекает из пипетки по одной капле за 4 сек в эвакуированный сосуд D, который помещен в жидкий воздух до уровня, лежащего выше конца пипетки. При испарении ртуть конденсируется на стенках сосуда, а капли примерзают к его дну. При прохождении через пипетку около 40 г ртути на стенках сконденсируется несколько миллиграммов ртутных паров. Найденная отсюда скорость испарения является максимальной и находится в соответствии с формулой (3).

Ценность исследовательской работы Кнудсена в том, что в ней вводится понятие о коэффициенте испарения α . Коэффициент испарения (конденсации) определяется как отношение скорости испарения в вакууме к максимальному значению скорости, определяемому по формуле (3). Коэффициент конденсации показывает, что из общего количества молекул пара, ударяющихся о поверхность конденсата, только часть α конденсируется, а оставшаяся часть $(1 - \alpha)$ молекул возвращается обратно в пар.

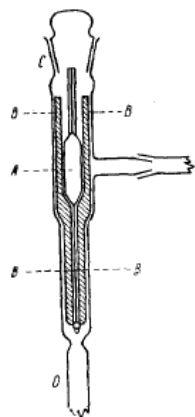


Рисунок 2 — Капельный метод Кнудсена.

Таким образом, действительная скорость испарения должна выражаться соотношением:

$$i = \alpha \frac{v}{4} \cdot (n_s - n), \quad [\text{молекул} / \text{см}^2 \text{сек}] \quad (4)$$

Это уравнение, называемое формулой Герца-Кнудсена, написано для общего случая, когда вещество испаряется в пар с давлением на границе фаз, определяемым концентрацией молекул $n < n_s$.

В настоящее время ведутся исследования зависимости скорости испарения от компонентного состава (различные твёрдые включения, например, соли), скорости капле и охлаждаемого воздуха, деформации капли в полёте (происходит изменение её формы и, как следствие, площади поверхности, что приводит к изменению интегральных характеристик теплообмена между поверхностью капли и окружающим воздухом). В данной дипломной работе скорость рассчитывается с помощью уравнения теплопереноса. Значение скорости испарения получается несколько завышенным, однако, такое решение вполне допустимо в рамках исследования.

В области испарения капель проведены множество численных и экспериментальных исследований, направленных на выяснение поведения испаряющейся капли, неподвижной, лежащей на подложке, движущейся в потоке, в среде с высокими температурами, с твёрдыми включениями и пр.

В статье [8] проводится экспериментальное исследование механизма бурного испарения капель воды с твердыми включениями и влияния на характеристики этого процесса, концентрации и размеров твердых включений. В результате исследования было выяснено: изменение относительной массовой доли твердых включений от 0 до 0,01 в каплях воды (размерами 1-5 мм) влечет за собой увеличение скорости испарения последних в области высокотемпературных газов в несколько раз; увеличение размеров включений приводит к усилению их влияния на интегральные характеристики прогрева капель и скорости фазовых превращений. При этом выявлено, что исключительно важную роль в системе "жидкость–твердые включения–высокотемпературные газы" играет радиационный механизм теплообмена. Полученные по результатам экспериментов зависимости не только иллюстрируют влияние твердых включений на скорость испарения капель воды при движении через высокотемпературную газовую среду. Экспериментальные результаты служат основой для дальнейшего развития моделей испарения жидкостей в условиях интенсивного нагрева [8].

В работе [9] проводится анализ процесса испарения капли с твердым непрозрачным включением при движении через высокотемпературную газовую среду в зависимости от формы включения и его положения в капле. Экспериментально выяснено, что при движении капли твердые включения чаще всего располагаются либо внизу капли, либо частично выступают с поверхности капли. Во втором случае испарение происходит быстрее. Также имеет влияние массовая доля включения, к примеру, при соотношении примерно равном единице, масса испарившейся воды больше, чем при меньшей данной величине. Количество испарившейся жидкости также

зависит и от площади поверхности включения: при цилиндрической форме включения интенсификация испарения максимальна.

В работе [10] выполнено численное исследование динамики поведения лежащей капли и изучена эволюция формы капли при нарушении термодинамического равновесия в системе подложка-капля-газ. Из расчетов следует, что на начальной стадии процесса создаются свободные колебания поверхности капли, частота которых совпадает с частотой основной моды. После затухания колебаний профиль капли остается равновесным, определяемым уравнением Лапласа. Длительность переходного интервала зависит от вязкости жидкости и для капли воды массой 0,525 мг составляет 0,1 с. Интервал установления равновесного профиля этой капли, таким образом, мал, и не может повлиять на точность измерения поверхностного натяжения методом лежащей капли [10].

Проводятся численные исследования процессов тепломассопереноса при движении одиночной и нескольких капель воды через высокотемпературные продукты сгорания типичного горючего вещества для применения в пожаротушении. Выяснено, что при малых расстояниях между двумя каплями интенсивность испарения воды на внутренних (между каплями) границах существенно уменьшается по сравнению с одиночной каплей [11].

В данной работе делается попытка проследить испарение капли с учётом наличия в ней твердой фазы. Также нужно учесть зависимость коэффициента диффузии от массовой доли растворенного вещества в капле.

В 1905 году для коэффициента диффузии в жидкостях Альбертом Эйнштейном была выведена формула:

$$D_{AB} = \frac{RT}{6\pi\eta_B r_A}, \quad (5)$$

где η_B —вязкость растворителя, r_A —радиус сферической молекулы растворенного вещества.

Данная зависимость (5) называется уравнением Стокса–Эйнштейна. Несмотря на то, что оно было выведено для очень частного случая [7] (сферические молекулы большого размера, диффундирующие в разбавленных растворах), уравнение даёт верные по порядку величины оценки коэффициента диффузии.

Позднее для определения коэффициента диффузии в бинарных смесях были разработаны другие корреляции, такие как метод Вильке–Ченга, корреляция Шайбеля, корреляция Редди–Дорэсвейми, Лусиса–Ратклифа, Кинга, Хсу и Мао, Гайдука–Лоди. В результате проверки методов были выявлены рекомендуемые к использованию соотношения: Гайдука–Лоди и метод Вильке–Ченга. Рассмотрим подробнее данные методы.

Метод Вильке–Ченга является модификацией уравнения Стокса–Эйнштейна:

$$D_{AB}^0 = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{(\Phi M_B)^{0.5} T}{\eta_B V_A^{0.6}}, \quad (6)$$

где D_{AB}^0 – коэффициент взаимной диффузии растворенного вещества А в растворителе В при очень низкой концентрации А, $\text{см}^2/\text{с}$; M_B – молекулярная масса растворителя; T – температура, К; η_B – вязкость растворителя В, сП; V_A – мольный объём растворенного вещества А при его нормальной температуре кипения, $\text{см}^3/\text{моль}$; Φ – параметр ассоциации растворителя В, безразмерный [7].

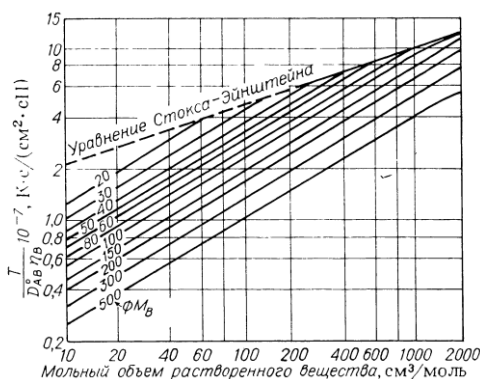


Рисунок 3 – Графическое изображение корреляции Вильке–Ченга для коэффициентов диффузии в разбавленных растворах.

Рекомендованное значение Φ для воды в качестве растворителя 2,26. Средняя погрешность метода составляет около 10%.

Корреляция Гайдука – Лоди предназначена для коэффициентов диффузии неэлектролитов при бесконечном разбавлении в воде.

$$D_{AW}^0 = 13,26 \cdot 10^{-5} \cdot \eta_W^{-1,14} \cdot V_A^{-0,589}, \quad (7)$$

где η_W – вязкость воды, сП; V_A – мольный объём растворенного вещества при его нормальной температуре кипения, см³/моль; D_{AW}^0 – бинарный коэффициент диффузии при бесконечном разбавлении, см²/с [7].

Средняя погрешность метода составляет 5,9%.

Были предложены несколько способов для оценки влияния концентрационной зависимости коэффициента диффузии.

$$\text{Метод Вайнеса: } D'_{AB} = (D_{AB}^0)^{x_B} \cdot (D_{BA}^0)^{x_A}, \quad (8)$$

где x_B, x_A – мольные доли веществ.

Этот метод наиболее общий, в большинстве случаев точный и проверенный. Не требует знания вязкости, прост в применении.

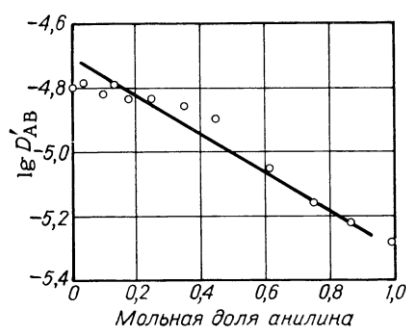


Рисунок 4 – График Вайнеса для системы анилин-тетрахлорметан при 25°C.

Далее при использовании соотношения Вайнеса было выведено уравнение: $D'_{AB} \cdot \eta = (D_{AB}^0 \cdot \eta_B)^{x_B} \cdot (D_{BA}^0 \cdot \eta_A)^{x_A}$. (9)

Выведенное соотношение было проверено на одиннадцати системах, выявлено, что результаты более точно соответствуют экспериментальным данным, нежели в формуле Вайнеса.

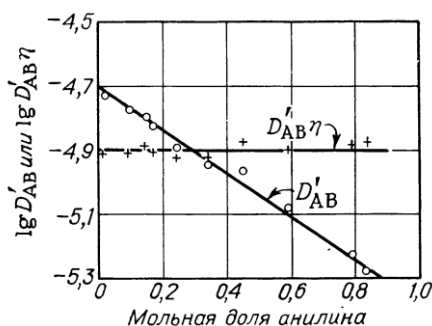


Рисунок 5 – График Вайнеса для системы анилин-бензол.

Далее Андерсеном было выяснено, что на коэффициенты диффузии макромолекул влияет объёмная доля растворенного вещества. Для гемоглобина, диффундирующего в растворах солей:

$$\frac{D_{AB}}{D_{AB}^0} = (1 - \Phi)^{6,5}, \quad (10)$$

где D_{AB} — коэффициент диффузии при бесконечном разбавлении; Φ — мольная доля растворенного вещества.

Не существует единственно верного метода, который бы всегда точно учитывал влияние концентрации на коэффициент диффузии в жидкости. Выбор корреляции зависит от решаемой задачи.

2 Моделирование высыхания капли жидкости с учетом диффузии твёрдой фазы в виде растворенной соли или других мелкодисперсных частиц.

В данной модели считается, что процессы испарения приводят только к удалению раствора с внешней поверхности капли и созданию увеличенной концентрации помещенного в каплю твердого компонента. Так как испарение происходит под воздействием температуры, необходимо сравнить характерные времена этих процессов, чтобы идентифицировать наиболее важные факторы в процессе.

Оценка показывает, что характерное время диффузии паров растворителя много меньше, чем время прогрева. Следовательно, диффузия пара происходит много быстрее, чем высыхание капли и достигает стационарного состояния прежде, чем произойдёт существенное изменение размера капли.

Исходя из подобных соображений, можно предположить, что профиль температуры воздуха (пара) и капли достигнет стационарного состояния до высыхания капли.

Из приведенных выше рассуждений, можно сделать вывод, что диффузия раствора при высокой влажности – самый медленный процесс, но при низких влажностях скорость усадки капли может быть сравнима (немного больше/меньше) со скоростью диффузии раствора.

Поэтому, чтобы понять, какие факторы управляют процессом формирования частицы, была разработана модель, включающая диффузию раствора и скорость усадки капли [12].

Когда капля движется относительно окружающей среды, скорость испарения больше на «ведущей» поверхности капли и, следовательно, концентрация раствора там тоже больше. Чтобы определить, как профиль концентрации изменяется внутри капли в этом случае, требуется включение

зависимости концентрации в уравнение диффузии. По аналогии с формулой, предложенной Андерсеном для гемоглобина, введем зависимость коэффициента диффузии от массовой доли следующего вида:

$$D = D_0 \cdot (1 - \Phi)^k, \quad (11)$$

где D_0 – начальный коэффициент диффузии, Φ – мольная доля растворенного вещества, k – показатель степени в соотношении (11).

Впоследствии проведем анализ влияния зависимости коэффициента диффузии от массовой доли на динамику формирования фронта концентраций.

Физическая постановка

В данной работе исследуется процесс диффузии при испарении в равновеликой сферической капле с твёрдыми включениями в виде поваренной соли NaCl радиусом R , летящей в потоке. Температуры пара и капли заданы $T_{\text{Var}} = 500$ К, $T_{\text{Liq}} = 100$ К. Предполагается осевая симметрия формы капли, проходящих в ней процессов (распределения массовых долей, температур и т.д.).

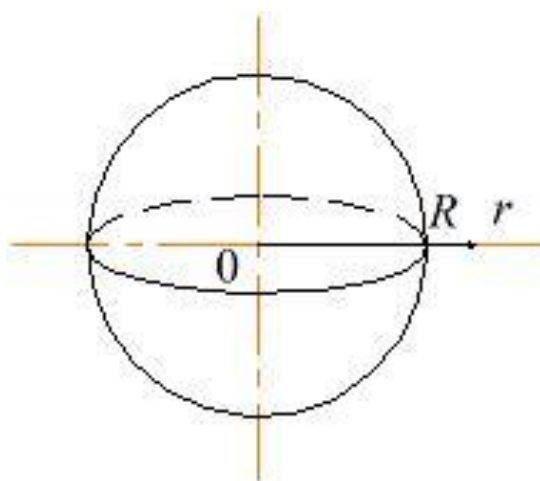


Рисунок 6 – Геометрия задачи.

Математическая постановка

Математическая модель процессов теплопроводности и диффузии описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial E}{\partial r} = \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{D}{\rho} \cdot \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial E}{\partial r}, \quad (12)$$

для удобства запишем в виде:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \left(\frac{D}{\rho} \cdot \frac{2}{r} - U \right) \cdot \frac{\partial E}{\partial r}. \quad (13)$$

Решаем задачу для изменяющейся области, в которой центр, совпадающий с центром капли находится в неподвижном состоянии, а внешний радиус (диаметр) вследствие испарения уменьшается.

Поэтому временная производная от массовой доли:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = \frac{\partial E}{\partial \tau} + \frac{\partial r}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial E}{\partial r}$$

имеет конвективную составляющую, которую характеризует изменение положения узлов в координатной сетке

$$\frac{\partial r}{\partial \tau} = U(r);$$

$$U(r) = 0;$$

$$U(R) = U_{\text{isp}}.$$

Закон изменения размеров капли:

$$\frac{\partial R_{\text{max}}}{\partial \tau} = U_R.$$

Начальные и граничные условия

Записываются начальные граничные условия, в центре симметрии при $R=0$, а также условие, связанное с удалением массы и увеличением вследствие этого массовой доли на границе.

В начальный момент времени считается, что соль равномерно распределяется по всей капле.

В качестве граничного условия применяется условие в центре капли, являющимся центром симметрии.

Далее ставится граничное условие, обуславливающее скорость роста концентрации за счет испарения воды, который соответствует диффузионному потоку внутри капли.

$$\begin{cases} E = E_0, & \text{при } t = 0; \\ \frac{\partial E}{\partial r} = 0, & \text{при } r = 0 (\text{в центре симметрии}); \\ -D \frac{\partial E}{\partial r} = -\frac{E}{1-E} \cdot G, & \text{при } r = R(t). \end{cases} \quad (14)$$

Расход уходящей воды находится по соотношению:

$$G = \rho_v \cdot c, \quad (15)$$

где ρ_v — плотность воды, c — теплоемкость воды.

Коэффициент диффузии

Ранее было сказано, что для уточнения математической модели, вводится соотношение (11). Здесь значение начального коэффициента диффузии принимается по экспериментальным данным ($D_0 = 0,000000001 \text{ м}^2/\text{с}$), а мольная доля растворенного вещества Φ находится по формуле:

$\Phi = \frac{E}{\mu}$, где E – массовая доля растворенного вещества, μ – молярная масса соли (в данном случае берется поваренная соль NaCl).

Далее будет возможность проследить изменение массовой доли E от степени k и рода вещества.

Скорость испарения

В данном расчете считается, что капля обдувается потоком и испаренный растворитель мгновенно уносится, т.е. происходит кинетический режим испарения. Тогда скорость испарения воды, как было уже сказано в главе I, определяется из уравнения теплопереноса:

$$U \cdot \rho_B \cdot r = \alpha(t_{\pi} - t_K), \quad (15)$$

$$\text{где } \alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 2 \cdot \frac{\lambda}{2R_0} = \frac{\lambda}{R_0}. \quad (16)$$

Тогда получим выражение для определения скорости:

$$U = \frac{\lambda}{R_0} \cdot \frac{(t_{\pi} - t_K)}{\rho_B \cdot r}. \quad (17)$$

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б2Б	Аёшиной Т.Н.

Институт	Энергетический	Кафедра	теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	бакалавр	Направление	13.13.01

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов, амортизационные отчисления, заработная плата научного руководителя.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы амортизации, нормы премии по счету заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Ставка по отчислениям во внебюджетные фонды.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Экспертная оценка сравнения ресурсоэффективности и оценки программных разработок.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление бюджета НИР
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Анализ критериев ресурсоэффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Попова С.Н.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б2Б	Аёшина Т.Н.		

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

Тема: Исследование процесса испарения в капле с учетом наличия в ней твердой фазы.

Область применения разработок проекта.

Программный продукт данного исследования широко применяются во многих технологиях, таких, как распылительная сушка, испарительное охлаждение, сжигание углеводородного топлива, работа газотурбинных генераторов. На основе данного исследования также могут проводиться разработки технологии производства теплоизоляционных покрытий с улучшенными техническими характеристикам, обладающими рядом преимуществ, относительно ныне существующих теплоизоляционных покрытий (активно противостоят коррозии, повышается степень теплоизоляционной защиты, улучшение адгезии).

Преимущества моделирования по сравнению с экспериментальным исследованием.

Основной причиной эффективности численного моделирования является отсутствие высоких денежных и временных затрат на реализацию проекта, а также огромное количество вариаций решаемых задач, что увеличивает возможность применения программного продукта.

При осуществлении экспериментального исследования присутствуют затраты на экспериментальную установку (монтаж, эксплуатацию, наладку), материалы исследования (дорогостоящие вещества, различные подложки из благородных металлов и т.д.), измерительные электронные приборы и т.д. Кроме того, существует опасность выхода из строя установки и возникновения чрезвычайных ситуаций. Численные исследования, в свою очередь, не требуют значительных затрат и более безопасны.

В зависимости от вида решаемой задачи выбирается программа, в которой моделируется решение. Для реализации исследования и разработки программы можно использовать Delphi, Pascal ABC. Так как Pascal ABC обладает достаточным набором функций, а также лучше изучен исследователем, работа проводилась с помощью данной программы.

Календарный план-график выполнения НИР

Календарный план НИР устанавливает очерёдность выполнения работ в увязке со временем их исполнения. Сроки исполнения зависят от сложности операций на каждом из этапов, что отображено в таблице 1.

Таблица 1 – Календарный план выполнения НИР

№ этапа	Основные этапы выполнения НИР	Содержание каждого этапа	Срок выполнения
1	2	3	4
1	Выбор темы и технического задания для ВКР	Составление и утверждение технического задания	2 недели
		Оформление технического задания	
2	Разработка теоретической части НИР	Обзор литературы по данной тематике	4 недели
		Описание физической модели исследования	
		Описание математической модели исследования	
3	Разработка практической части НИР	Выбор среды программирования	7 недель
		Разработка методики описания математической модели в среде программирования	
		Составление программы	
		Сбор результатов вычислений программы	
		Анализ результатов	

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4
4	Разработка части «Финансовый менеджмент»	Описание целей, и преимуществ проекта	2 недели
		Календарный план-график проекта	
		Бюджетный план проекта	
5	Разработка части «Социальная ответственность»	Описание рабочего места	2 недели
		Анализ вредных и опасных факторов рабочей среды	
		Расчет искусственного освещения для рабочего помещения	

Представим графически календарный план выполнения НИР. Для этого построим диаграмму Ганта.

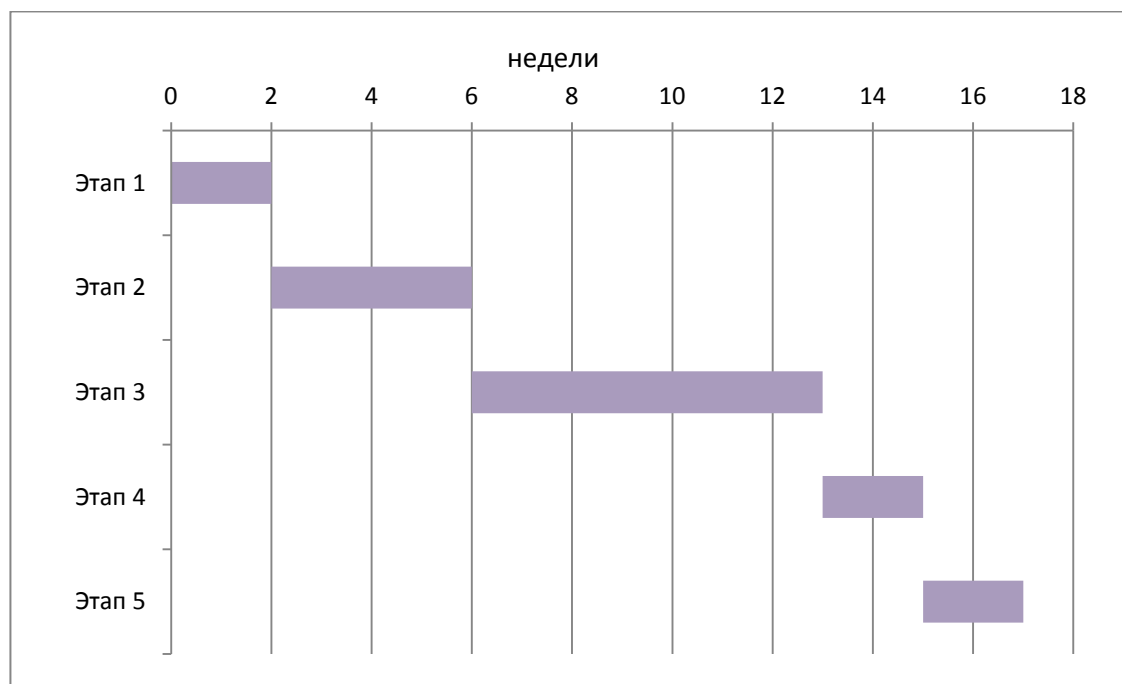


Рисунок 1 – Диаграмма Ганта по выполнению НИР.

Бюджетный план

Исходя из стоимости на используемые в работе материалы, а также затрат на электроэнергию составляется бюджетный план проекта. Затраты на

электроэнергию рассчитываются по нормам электропотребления приборов и длительности использования за период выполнения НИР.

Таблица 2 – Расходы на материалы

Расходы	Ед. измерения	Цена	Кол-во	Итого
Канцтовары	-	-	-	1295
Заправка картриджа	шт	500	1	500
Электроэнергия	кВт·ч	4,25	44	187
Итого				1 982

Таблица 3 – Канцтовары

Наименование	Цена
Бумага	300
Ручки	95
Флешка	900
Итого	1295

Таблица 4 – Потребление электроэнергии

Источник потребления	Мощность, кВт/ч	Кол-во часов	Итого
Персональный компьютер	0,2	200	40
Ноутбук	0,06	20	1,2
Освещение	0,05	54	2,7
Принтер и МФУ	0,05	2	0,1
Итого			44

В связи с изнашиванием оборудования в процессе выполнения работы стоит учитывать затраты на его амортизацию. Расчёт производится по следующим соотношениям:

Норма амортизации = $(1/\text{срок службы}) \cdot 100$;

Величина амортизации в год = $(\text{стоимость оборудования} \cdot \text{норма амортизации}) / 100$;

Сумма амортизации в час = $\text{величина амортизации в год} / \text{количество часов работы в год}$;

Стоимость амортизации = $\text{время работы} \cdot \text{сумма амортизации в час}$.

Данные об амортизационных отчислениях сведены в таблицу 5.

Таблица 5– Амортизация

Объект	Норма в год	Стоимость	Величина в год	Кол- во часов	Сумма в час	Время работы, ч.	Стоимость амортизации
Персональный компьютер	20	50000	10000	1720	5,81	200	1162
Принтер и МФУ	20	8000	1600	382	4,18	2	8,36
Ноутбук	20	30000	6000	2290	2,62	20	52,4
Итого							1222,76