

На правах рукописи



Старинская Елена Михайловна

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ
БИНАРНЫХ СМЕСЕЙ И НАНОЖИДКОСТЕЙ**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор РАН Терехов Владимир Викторович

Официальные оппоненты:

Кузнецов Гений Владимирович - доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет", Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, профессор, г. Томск

Снегирёв Александр Юрьевич - доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", Физико-механический институт, профессор, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 8.06.2022 в 9.30 на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru/>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан «___» апреля 2022 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н.



Низовцев Михаил Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Исследования в области испарения капель различных жидкостей проводятся десятилетиями и в настоящее время вызывают все возрастающий интерес. Это связано с важной ролью, которую этот процесс играет в многочисленных технологических приложениях, например, при капельном охлаждении поверхностей, при распыле жидких топлив, в тепло- и массообменных аппаратах и т.д. Несмотря на огромное количество исследований в данной области, остается множество нерешенных задач. Анализ имеющихся работ по исследованию скорости испарения, показал, что результаты экспериментов зачастую противоречивы и разрознены. Несмотря на значительное число работ, рассматривающих задачу испарения многокомпонентных капель, не создана единая теория испарения капель сложного состава, которая отражала бы все эффекты, полученные исследователями в экспериментах. Особое внимание уделяется исследованиям, направленным на изучение бинарных систем, представляющих собой коллоидные растворы или наножидкости.

Наножидкости интересны для современной науки, что обусловлено растущим кругом приложений, в которых такие жидкости могут быть использованы. В последнее время актуальной задачей является создание новых видов топлив для двигательных установок высокой мощности. Так, в традиционные жидкие топлива добавляют наночастицы различных материалов для улучшения их характеристик. С испарением капель наножидкостей связаны процессы окраски, нанесения покрытий, формирования рисунка на поверхности, осаждении частиц и т. д. Однако, следует отметить, что имеющиеся данные о влиянии концентрации наночастиц на эффективность испарения капель обладают крайней противоречивостью. Показана как значительная интенсификация, так и существенное уменьшение скорости испарения при добавлении наночастиц в жидкость. На сегодняшний день в мире нет исчерпывающего объяснения этим результатам, что является следствием исключительно сложной физики явлений и многофакторности изучаемого процесса.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование испарения одиночных подвешенных капель бинарного раствора этанол-вода и наножидкостей для широкого диапазона концентраций компонентов, а также скоростей и температур окружающей среды.

Задачи, поставленные в соответствии с целью работы:

1. Создать стенд для проведения экспериментов по изучению испарения капель различных жидкостей в условиях свободной и вынужденной конвекции. Выделить основные параметры, влияющие на неопределенность получаемых данных.

2. Изучить процессы тепломассообмена, сопутствующие процессу испарения капель бинарного раствора этанол-вода в широком диапазоне условий (скорость и температура окружающей среды, концентрация летучего компонента в растворе).

3. Исследовать зависимость эффективности испарения от температуры и скорости окружающей среды для капель бинарного раствора этанол-вода и наножидкости с частицами SiO_2 .

4. Оценить влияние концентраций наночастиц в жидкости и/или летучего компонента в бинарном растворе на скорость испарения подвешенных капель в различных условиях окружающей среды.

Научная новизна.

1. Получены новые данные о динамике испарения подвешенных капель неидеального раствора этанол-вода в широком диапазоне концентраций летучего компонента при вариации скорости потока воздуха и его температуры. Проведен параметрический анализ влияния основных факторов на тепло- и массообмен в процессе испарения капель бинарных растворов. Установлено слабое влияние начальной концентрации этанола на изменение температуры поверхности капли во времени. Показано, что скорость испарения имеет немонотонный характер в зависимости от концентраций летучего компонента в растворе.

2. Впервые получены данные о динамике испарения подвешенных капель коллоидных систем вода/наночастицы SiO_2 . Представлены зависимости скорости испарения от концентрации наночастиц при различных температурах и скоростях воздуха, обтекающего каплю. Показано, что при малых концентрациях наночастиц SiO_2 в жидкости (0,1 wt. %) испарение происходит менее интенсивно по сравнению с базовой жидкостью. В области концентраций свыше 2 wt. % обнаружено немонотонное влияние содержания наночастиц в жидкости на скорость испарения.

3. Предложен механизм испарения наножидкости с низкой концентрацией наночастиц. Уменьшение интенсивности испарения жидкости в капле обусловлено накоплением частиц вблизи поверхности. Показано, что лимитирующим фактором является диффузия наночастиц в жидкости. Данный механизм может быть использован для построения физико-математических моделей.

Научная и практическая значимость работы.

Получена база экспериментальных данных о тепло- и массообмене в процессах испарения подвешенных капель неидеального раствора этанол-вода в условиях вынужденной конвекции для различных концентраций летучего компонента. Знание закономерностей тепломассообмена необходимо для прогнозирования скорости испарения капель бинарных растворов, проверки теоретических моделей, и повышения эффективности систем охлаждения, теплообменных аппаратов высокой производительности и т.п.

Впервые получены данные о скорости испарения и динамике температуры в случае подвешенной капли наножидкости в широком диапазоне концентраций наночастиц и условий окружающей среды (температуры и скорости набегающего потока). Представленные в диссертации данные могут быть использованы при разработке и оптимизации теплообменных аппаратов, при проектировании устройств, использующих капельное охлаждение и т.д. Полученные результаты важны как фундаментальная основа для развития методов осаждения наночастиц за счет испарения капель коллоидных растворов, а также могут применяться для уточнения современных математических моделей.

На защиту выносятся

1. Методика учета тепловых потерь в подвешенную каплю жидкости при проведении экспериментальных исследований, моделирующих испарение капли, обтекаемой потоком воздуха;
2. Результаты экспериментального исследования скорости испарения неидеальных растворов этанол-вода в широком диапазоне концентраций летучего компонента от 0 до 94 %;
3. Влияние концентрации летучего компонента на эффективность испарения подвешенных капель бинарного раствора этанол-вода при вариации скорости обтекания капли;
4. Влияние концентрации наночастиц в жидкости на эффективность испарения подвешенных капель коллоидных систем вода/наночастицы SiO_2 при вариации скорости обтекания капли;
5. Механизм испарения подвешенных капель наножидкостей с наночастицами SiO_2 , объясняющий уменьшение интенсивности испарения несущей фазы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов диагностики температур и размеров испаряющейся капли, анализом неопределенностей измерений, проведением калибровочных и тестовых измерений. Результаты моделирования качественно описывают полученные экспериментальные данные. Выбранные экспериментальные режимы характеризуются воспроизводимостью и согласуются с результатами работ других авторов в верификационных опытах.

Личный вклад соискателя состоит в разработке новых и модификации имеющихся экспериментальных стендов, адаптации измерительного оборудования к условиям экспериментов, проведении экспериментальных исследований по тепло- и массообмену испаряющихся капель, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных данных, а также подготовке научных докладов и публикаций. Все опытные данные, включенные в диссертацию, получены при непосредственном участии автора. Постановка задачи и основные методы исследования сформулированы руководителем диссертационной работы д.ф.–м.н. В.В. Тереховым.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ (Москва, 2014, 2018); Всероссийской школе–конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2014, 2016, 2020); Школе–семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (Звенигород, 2015, Санкт–Петербург, 2017, Москва, 2019, Екатеринбург, 2021); Сибирском теплофизическом семинаре, (Новосибирск, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021); Научно–практической конференции "Энергетика–Экология– Энергосбережение" (Калуга, 2016); XV Минский международный форум по тепломассообмену (Минск, 2016); International seminar with elements of scientific school for young scientists (Новосибирск, 2016); 2nd Int. School of Young Scientists “Interfacial Phenomena and Heat Transfer” (Новосибирск, 2017); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017); International Heat Transfer Conference, IHTC 16 (Beijing, China, 2018); International seminar with elements of scientific school for young scientists, ISHM–VII (Новосибирск, 2018); V Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, Республика Крым, 2020); SWEP Workshop 2021 (Brighton, UK (online), 2021); The Second Sino–Russian Bilateral Symposium on Nano Surface Technology and Surface Effect (Новосибирск, 2021).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 33 работы, включая 13 статей, в том числе 12 статей – в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Работа изложена на 114 листах машинописного текста, включая 78 рисунков, библиографического списка из 176 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору современного состояния исследований процессов тепло- и массообмена при испарении капель различных жидкостей. Процессы испарения капель исследовались не одно десятилетие, первые работы появились еще в конце XIX века. Однако, наибольшее развитие наука о теплообмене капель получила в середине

прошлого столетия. Это связано с важной ролью, которую этот процесс играет в многочисленных технологических приложениях, например, при спрейном охлаждении поверхностей, при распыле жидких топлив в двигателях внутреннего сгорания, в теплообменных аппаратах и т.д. (Tsoy and Snegirev, 2015). Исследования в этом направлении не потеряли своей актуальности и по сегодняшний день в силу необходимости решения новых задач в энергетике, химической технологии, биологии и медицине.

Работы по испарению капель можно сгруппировать по методу их исследования: левитирующие и падающие (Yarin, Brenn and Rensink, 2002), капли, испаряющиеся с твердой поверхности (sessile droplet) (Hsu *et al.*, 2015) или подвешенные на нити (pendant droplet) (Chini and Amirfazli, 2013). С помощью левитирующих капель исследуют тепломассоперенос на поверхности капли, однако, акустическая левитация приводит к акустическому течению около поверхности капли, что может повлиять на скорость испарения. Испарение капель с твердых поверхностей является важным фундаментальным процессом, используемым в различных приложениях, включая охлаждение поверхностей за счет фазового перехода, струйную печать, контролируемое нанесение самоорганизующихся поверхностных покрытий и многие другие (Pan *et al.*, 2013). Испарение капли с твердой поверхности – сложный процесс, управляемый механизмами переноса, которые включают в себя диффузию пара, охлаждение за счет испарения, сопряженную теплопередачу и конвекцию жидкости (Batishcheva *et al.*, 2021).

Изучение аэродинамики и тепломассопереноса непосредственно на движущихся в потоке капель жидкости сопряжено с большими трудностями. Поэтому, как правило, эти процессы моделируются на подвешенных неподвижных каплях при их обдуве потоком газа. Таким методом были получены классические данные по законам тепломассообмена при испарении чистых жидкостей (Ranz 1952), в том числе и в высокотемпературной среде (Rensizbulut and Yuen, 1983). При этом, как отмечается в большом числе работ (Yuen and Chen, 1978; Han *et al.*, 2016), могут возникнуть значительные погрешности измерения, обусловленные влиянием кондуктивного теплопритока через термопарный провод или специальные поддерживающие нити, а также свободную конвекцию и радиационный теплоперенос. Наличие дополнительных тепловых потоков приводит к тому, что процесс испарения становится неадиабатическим.

Экспериментальные исследования испарения многокомпонентных капель или бинарных растворов весьма ограничены (Brenn *et al.*, 2007; Lehmann *et al.*, 2015). Кроме известных трудностей измерения скорости испарения чистых жидкостей, связанных с влиянием свободной конвекции и радиационного теплопереноса (Borodulin *et al.*, 2017), а также кондуктивного теплопритока от поддерживающей каплю нити (Yang and Wong, 2002), важное значение для многокомпонентных растворов имеет определение изменения

концентраций компонентов внутри капли и на ее поверхности по времени. В последнее время предложены различные экспериментальные методики измерения концентраций компонентов бинарной смеси (Brenn, 2005; Назаров, Терехов и Шишкин, 2011), однако, точность этих методов остается еще недостаточной. Знание особенностей тепломассообмена одиночных капель бинарных и многокомпонентных растворов является необходимым при численном и экспериментальном исследованиях газокapельных струй и спреев (Terekhov and Pakhomov, 2005; Карпов *и др.*, 2015).

Существующие данные о влиянии наночастиц на эффективность испарения капель обладают крайней противоречивостью. Исследователи наблюдают как значительную интенсификацию процесса испарения (Xu *et al.*, 2019), так и существенное уменьшение скорости испарения (Yong, Qin, and Singler, 2016). В ряде работ отмечается отсутствие влияния добавки наночастиц к базовой жидкости на скорость испарения (Gerken *et al.*, 2014), либо это влияние весьма слабое (Chen, Phuoc and Martello, 2010). В настоящее время достаточно сложно дать исчерпывающие объяснения этим результатам, что является следствием исключительно сложной физики явлений и многофакторности изучаемого процесса. Воздействующими параметрами на процесс испарения являются состав базовой жидкости, материал, размер, форма и концентрация наночастиц, геометрия капель и их поверхностное натяжение; условия окружающей среды (скорость, температура и относительная влажность окружающего потока); особенности лучистого теплопереноса при наличии наночастиц в жидкой фазе и многое другое.

Анализ имеющихся работ по исследованию процессов тепло- и массообмена при испарении капель (Daïf *et al.*, 1998; Sazhin, 2006), показал, что результаты экспериментов зачастую противоречивы и разрознены. Во многом это обусловлено тем, что исследование скорости испарения является достаточно сложной задачей, включающей в себя необходимость совместного решения задач газодинамики и тепломассопереноса, как в газовой, так и в жидкой фазах.

Вторая глава посвящена описанию разработанного экспериментального стенда, методике проведения экспериментов, достоверности и неопределенности полученных данных.

Экспериментальное исследование скорости испарения подвешенной капли жидкости проводилось на стенде, схематично изображенном на Рисунке 1. Установка позволяет варьировать скорость и температуру набегающего потока, а также контролировать влажность за счет закрытого короба. В экспериментах капля фиксируется на держателе, который представляет собой перекрестие из нитей толщиной 100 мкм, над соплом в закрытом корпусе с ИК и оптически прозрачными стенками.

Отработана методика эксперимента по испарению одиночной капли в условиях сложного теплообмена. Определены границы достоверности данного метода по скоростям, температурам и влажности окружающей среды.

Так капля подвешивается на перекрестие из тонких нитей в поток воздуха. Для фиксации размера и температуры капли использовали бесконтактный метод измерения. Изменение диаметра капли фиксировалось камерой, размер капли определялся по полученным снимкам, форма капли считалась эллиптической. Динамика температуры фиксировалась тепловизионной камерой, температура капли определялась как средняя по поверхности. На первом этапе исследования были проведены тарировочные эксперименты, а также проведено сопоставление с работами других авторов и получено хорошее соответствие этих данных.

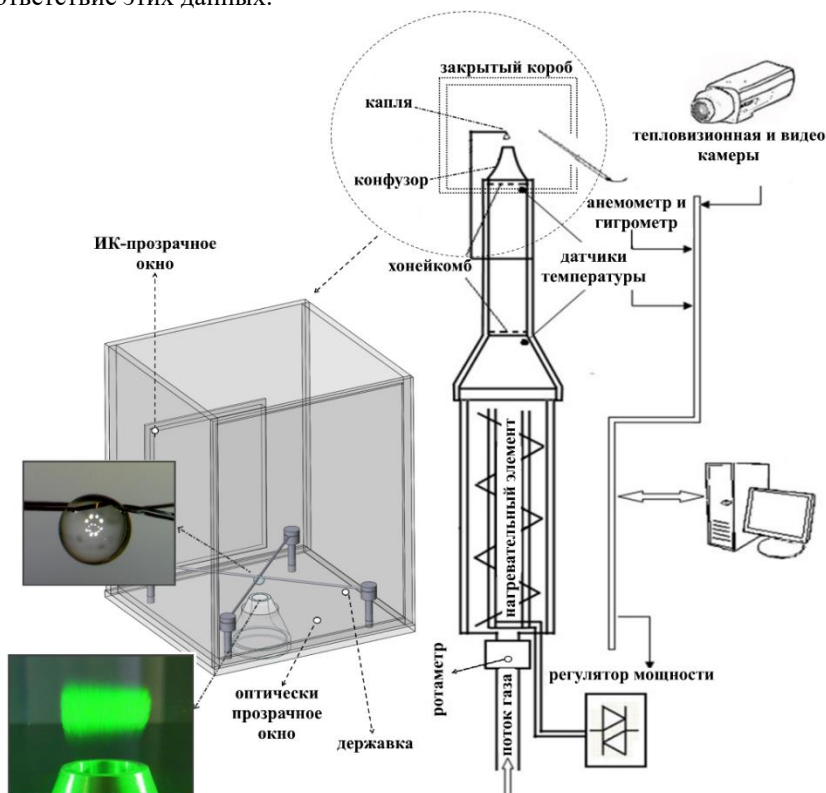


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

Для обобщения полученных экспериментальных данных используется выражение для изменения размера капли, полученного из диффузионной теории испарения в режиме преобладания вынужденной конвекции (Терехов и др., 2010):

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^{1.5} = 1 - K \cdot t/d_0^2, \quad (1)$$

Значение параметра K , характеризующего скорость испарения капли в зависимости от исходных условий экспериментов, определялось как угол наклона опытных точек на Рисунке 2а.

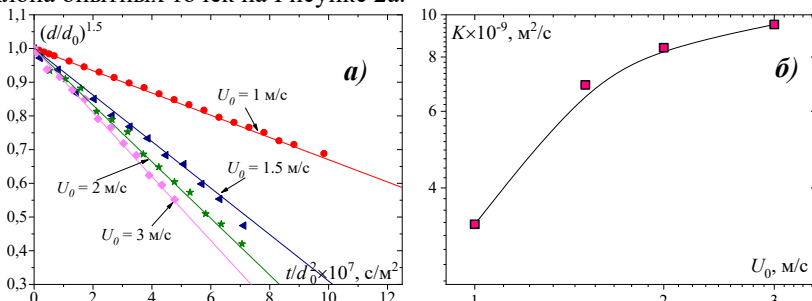


Рисунок 2 – Влияние скорости набегающего потока на процесс испарения. а) определение параметра K из динамики испарения; б) параметр K для разных скоростей набегающего потока

Проведено исследование влияния числа Рейнольдса на скорость испарения чистых жидкостей (воды). На Рисунке 2б показано, что с увеличением скорости набегающего потока скорость испарения также растет, однако изменение параметра K является не линейным и с увеличением значения скорости темп его прироста заметно понижается.

Представлено описание математической модели для одиночной капли, основанное на аналитических решениях уравнений (Abramzon and Sirignano, 1989) сохранения массы и энергии пара. Эти решения получены при условии сферической симметрии и дают явные выражения для скорости испарения капли. Математическая модель базируется на подходе, предложенном Абрамзоном и Сириньяно. Моделирование жидкой фазы включает в себя полный тепловой баланс испаряющейся капли. Температура поверхности капли, по которой определяется теплоперенос, может быть отлична от средней по объему температуры, где развивается значительный градиент. Таким образом на первом этапе вычисляется давление и массовая доля насыщенного пара (Клазиус-Клапейрон). На втором этапе вычисляются эффективные свойства, числа подобия (Рейнольдс, Нуссельт, Шервуд), число массопереноса, убыль массы, теплоперенос, количество тепла, поглощенного каплей в единицу времени.

По приведенной модели было проведено сопоставление с экспериментальными данными и обнаружено существенное расхождение. Таким образом, можно сделать вывод, что испарение подвешенных капель в реальных условиях является не адиабатным процессом. Поэтому необходимо оценить влияние всех компонентов теплового потока на поверхности капли. Используя известные соотношения для теплоотдачи свободной и вынужденной конвекций, а также кондуктивного и лучистого теплового потока, была проведена оценка тепловых потерь в экспериментах.

Соотношения между компонентами в зависимости от числа Ричардсона, изображенные на Рисунке 3, говорят о том, что наибольший вклад в тепловой баланс вносит вынужденная конвекция q_{fc} , практически в равной мере свободная конвекция q_{nc} и теплопроводность q_λ и, наконец, лучистый теплообмен q_r .

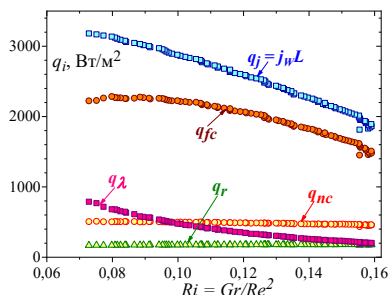


Рисунок 3 – Соотношение тепловых потоков на поверхности капли.

Начальные условия – $U_0 = 0,1$ м/с, $T_{0g} = 50$ °С, $\phi = 0$ %.

Разработана методика учета тепловых потерь в подвешенную каплю жидкости. Показано, что имеется оптимальный размер капли, зависящий от скорости обдува, при котором суммарный тепловой поток от свободной конвекции и теплопроводности от подвеса минимальный. Показано, что свободная конвекция и лучистый теплоперенос снижаются по мере уменьшения размера капли, тогда как теплоприток через державку возрастает. Поэтому суммарные тепловые потери являются минимальными при $d \approx 0,7$ – 1 мм. Однако уровень этих потерь может быть значительным, и они могут достигать 100%. Особенно велики потери теплоты при малых скоростях воздушного потока. При учете всех компонент тепловых потоков в каплю наблюдается согласие между экспериментальными и расчетными данными.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию процессов тепло и массообмена при испарении капель бинарного раствора этанол-вода в широком диапазоне концентраций летучего компонента. Получены экспериментальные данные по испарению подвешенных капель неидеального раствора этанол-вода при вариации температур (20 – 100 °С) и скоростей набегающего потока (0 – 1,5 м/с) для различных массовых концентраций этанола от 0 до 94 %.

Результаты экспериментов по испарению капель бинарного раствора с различным начальным содержанием этанола в неподвижной окружающей среде демонстрируются на Рисунке 4. В качестве примера на Рисунке 4а показано изменение диаметра капли во времени при концентрации этанола $C_0 = 47$ %. Видно, что процесс испарения имеет три характерные фазы с различными скоростями испарения, а продолжительность этих фаз соответствует t_1 , t_2 и t_3 .

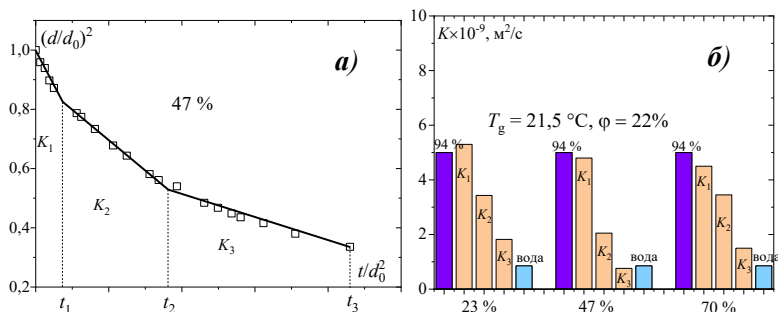


Рисунок 4 – Скорость испарения для раствора этанол-вода: а) концентрация 47%; б) концентрации 23 %, 47 %, 70%.

Величины скоростей испарения во время каждой фазы, характеризующиеся величиной K_i , показаны в виде диаграммы на Рисунке 4б. Здесь же для сравнения приведены скорости испарения чистых жидкостей воды и этанола, составляющих бинарную смесь. Скорость испарения во время первой фазы t_1 оказалась близкой к данным для этанола 94 %. Это говорит о том, что этанол преимущественно испаряется на этом этапе (Sefiane, Tadrist, and Douglas, 2003). Точно так же угол наклона фазы t_3 соответствует углу наклона чистой воды и имеет гораздо меньшую скорость испарения, чем фаза t_1 . Такой же нелинейный характер изменения скорости испарения наблюдается и при иных начальных составах ($C_0 = 23$ и 70% , Рисунок 4б) с той лишь разницей, что изменяются временные границы фаз (t_1 , t_2 и t_3) и величины скоростей испарения, что объясняется особенностями диффузионных процессов как внутри капли, так и снаружи.

При конвективном обтекании капли воздушным потоком имеет место иной характер изменения скорости испарения по времени. Границы между фазами испарительных процессов, наблюдаемые при отсутствии конвекции (Рис. 4а), размываются и опытные данные в этом случае хорошо описываются законом « d^2 ». Этому закону подчиняются данные при малых скоростях обтекания ($U_0 = 0,1$ м/с, $Re_0 = 5 - 11$). При высоких скоростях ($U_0 = 1,5$ м/с, $Re_0 = 100 - 200$), когда конвективный перенос теплоты превосходит кондуктивный, результаты экспериментов описываются законом « $d^{1.5}$ ». Вероятной причиной такого поведения скорости испарения является интенсификация процессов смешения компонентов внутри капли за счет возрастания сдвиговых напряжений, что приводит к выравниванию состава по радиусу капли.

Экспериментальные данные о скорости испарения капель бинарного раствора этанол-вода, характеризуемой параметром K , при испарении раствора этанол-вода с концентрациями от 0 до 94 % в слабоподвижной среде $U_0 = 0,1$ м/с ($Re_0 = 5 - 11$) при различных температурах набегающего потока в зависимости от концентрации этанола в водно-спиртовом растворе

демонстрируются на Рисунке 5а. Большее значение K соответствует увеличению скорости испарения. Для сопоставления на графике нанесены данные о скорости испарения других авторов (Бородулин и др., 2019). Обобщение экспериментальных данных для скорости испарения $U_0 = 1,5$ м/с ($Re_0 = 100 - 200$) при различных температурах набегающего потока в зависимости от концентрации этанола в водно-спиртовом растворе представлены на Рисунке 5б.

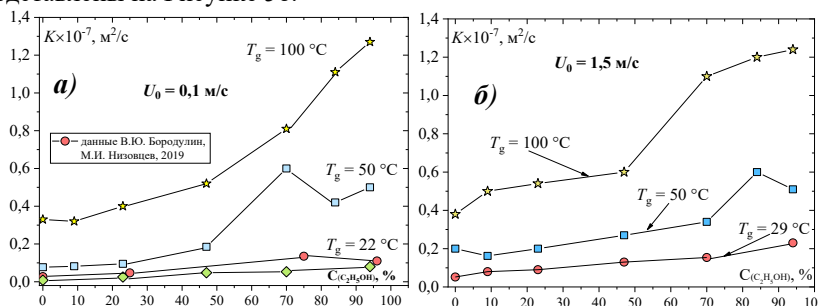


Рисунок 5 – Влияние концентрации этанола на процесс испарения капель при вынужденной конвекции. а) $Re = 5-11$; б) $Re = 100-200$.

Стоит отметить, что изменение скорости испарения в зависимости от концентраций компонентов является немонотонным. Как и следовало ожидать, капли с большим содержанием этанола испаряются быстрее. Такой же эффект оказывает и повышение температуры окружающей среды. Так капли водно-этанольного раствора с малым содержанием $C \leq 23\%$ ведут себя близко к воде. Концентрации выше 70% наоборот близки к спирту. Однако, при концентрации этанола 70% в режиме $T_g = 50^\circ\text{C}$ скорость испарения больше, чем у раствора с содержанием спирта 94%. Возможно данное явление связано с неидеальностью растворов и необходимо дальнейшее исследование в данном направлении.

Подобным образом ведут себя экспериментальные данные и при развитом конвективном обтекании капли. Это видно из Рис. 5б, где представлены результаты экспериментальных исследований динамики испарения капель неидеального раствора этанол – вода при скорости окружающей среды $U_0 = 1,5$ м/с с различной температурой.

Найдено немонотонное поведение скорости испарения для разных концентраций. Скорость испарения смесей с малым содержанием этанола ($C \leq 23\%$) близка к значениям воды. Смесей с содержанием этанола $C \geq 70\%$ имеют скорости испарения ближе к этанолу. Это может быть объяснено тем, что у водно-этанольных растворов свойства нелинейно зависят от количественного соотношения компонентов (Раева, 2013). Смещение пика скорости испарения для температуры окружающей среды 50°C к большим концентрациям наблюдалось другими авторами (Gurrall et al., 2019).

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию процесса испарения капель наножидкостей, подвешенных на нити, в широком диапазоне концентраций. В работе использованы сферические наночастицы диоксида кремния (SiO_2) фирмы AEROSIL размером 12 нм. В качестве базовой жидкости применялась дистиллированная вода. Выбор данных наночастиц определен тем, что нано размерный диоксид кремния используется в качестве добавок в лакокрасочные изделия, антикоррозионные, антифрикционные и гидрофобные покрытия и резиновые изделия. В строительной области они применяются в качестве добавок для бетонов, сухих строительных смесей, термостойких и теплоизоляционных материалов (Mulka et al., 2021).

Для приготовления наножидкости определенной массовой концентрации компоненты взвешивались на электронных весах. Затем наночастицы и базовая жидкость необходимых масс смешивались. Для получения стабильной гомогенной смеси с минимальной степенью агломерации частиц применялась обработка ультразвуком. Для анализа частиц в растворе были проведены их спектрофотометрические измерения. Полученные спектры пропускания проанализированы с помощью полной теории Ми. Показано равномерное распределение частиц в растворе и соответствие массовым концентрациям.

Экспериментальные исследования по влиянию наночастиц оксида кремния на скорость испарения капель воды были проведены в диапазоне массовых концентраций $C_{\text{SiO}_2} = 0 - 7\%$ для случая их испарения в слабоподвижной среде $U_0 = 0,1$ м/с и с различными температурами потока $T_g = 24, 50$ и 100 °С. Результаты измерений в виде зависимости коэффициента K от концентрации наночастиц показаны на Рисунке 6.

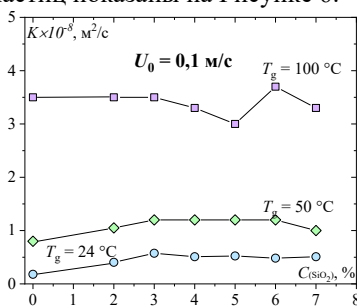


Рисунок 6 – Влияние наночастиц SiO_2 на скорость испарения капель.

Из представленного на Рисунке 6 обобщения опытных данных можно отметить немонотонное влияние концентраций наночастиц на скорость испарения. Вначале, при не высоких содержаниях наночастиц ($C_{\text{SiO}_2} < 3\%$), величина K возрастает, а затем начинает понижаться. Такая тенденция характерна для умеренных температур газовой среды $T_g < 50$ °С, в то время как при $T_g = 100$ °С добавление наночастиц SiO_2 в жидкость не существенно изменяет скорость испарения по сравнению с базовой жидкостью.

Из Рисунка 6 следует вывод, что добавление наночастиц в основном увеличивает скорость испарения по сравнению с чистой водой. Однако с увеличением температуры среды скорость испарения наножидкостей слабо отличается от чистой воды. Согласно имеющимся исследованиям наночастицы способны как замедлять скорость испарения (Gap and Qiao, 2011), так и наоборот увеличивать ее (Chen, Phuoc and Martello, 2010). Авторы (Yong et al., 2016) показали, что замедление скорости испарения за счет наночастиц, находящихся на поверхности, зависит от условий окружающей среды. Это указывает на оптимальную начальную концентрацию наночастиц в базовой жидкости для определенных условий испарения капли. Начальная концентрация и внешние условия испарения влияют на эволюцию размера капли наножидкости, скорость испарения перед образованием агломерата из частиц и его структуру (Brutin 2013).

Особый интерес представляют данные при малых концентрациях наночастиц (Ameen et al., 2010; Bhuiyan et al., 2015). Были проведены исследования динамики размера и температуры капли наножидкости с массовой концентрацией $C_{SiO_2} = 0,1\%$ при испарении в слабоподвижной среде $U_0 = 0,1$ м/с воздуха различной температуры. Все данные показаны в сравнении с базовой жидкостью (вода) (Рисунок 7).

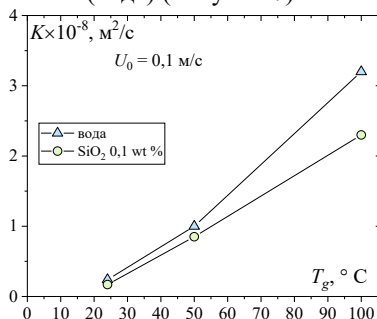


Рисунок 7 –Скорость испарения капель воды и наножидкости при различных температурах воздуха.

Главный вывод, следуемый из Рисунка 7, состоит в устойчивой тенденции снижения скорости испарения при наличии в капле наночастиц двуокиси кремния малой концентрации. Сравнить с какими-либо данными не представляется возможным, поскольку таких данных не обнаружено.

Для наножидкости с малой концентрацией наночастиц $C_{SiO_2} = 0,1\%$ наблюдается двухэтапное испарение (Рисунок 8). Такое поведение хорошо согласуется со случаем испарения бинарной жидкости, где различные скорости испарения обусловлены отличием в летучести компонентов. То есть испарение происходит по принципу – сначала уходит более летучий компоненты, а затем менее летучий. При этом каждому из этих компонентов соответствует своя адиабатическая температура испарения. Зачастую такой

характер испарения соответствует поведению идеальных растворов (Daïf et al., 1998).

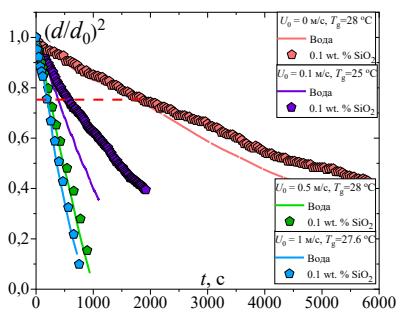


Рисунок 8 – Динамика относительного размера капель воды и наножидкости SiO_2 $C_{\text{SiO}_2}=0,1$ % для разных скоростей обдува.

Стоит отметить, что при малой концентрации частицы SiO_2 слабо влияют на теплофизические свойства (Rudyak, Minakov, and Pryazhnikov, 2017). Поэтому на начальном этапе капли воды и наножидкости SiO_2 испаряются идентично, а затем концентрация наночастиц на поверхности увеличивается, и они тормозят процесс испарения. Чем выше скорость испарения (из-за повышения температуры окружающей среды или скорости обдува) тем сильнее этот эффект (Рисунок 9).

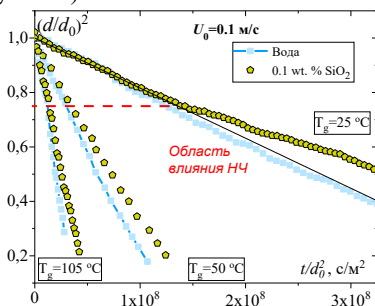


Рисунок 9 – Динамика относительного размера капель воды и наножидкости SiO_2 0,1 wt % для разных температур окружающей среды.

Была проведена оценка теплофизических свойств наножидкостей. Показано, что с увеличением концентрации частиц плотность наножидкости возрастает, тогда как теплота фазового перехода, напротив, снижается. По этой причине их взаимное влияние на скорость испарения компенсируется так, что скорость испарения капли наножидкости может совпадать с каплей чистой воды.

Как известно, твердые частицы концентрируются на поверхности за счет испарения гораздо быстрее, чем они могут диффундировать к центру капли (Lin et al., 2019). Характерное значение коэффициента диффузии для частиц рассматриваемого размера составляет (Wong et al., 2015) $D \sim 10^{-11}$ м²/с. Тогда

характерное смещение броуновской частицы за 800 с (которым соответствует переход к новой адиабатической температуре) согласно закону Эйнштейна-Смолуховского $\sim \sqrt{2Dt} = 0,15 \text{ мм}$, т.е. меньше, чем изменение диаметра капли за это время, которое составляет 0,3 мм. Эта грубая оценка показывает, что наночастицы будут постепенно накапливаться вблизи границы вода-воздух и тем самым влиять на процесс испарения (Рисунок 10).

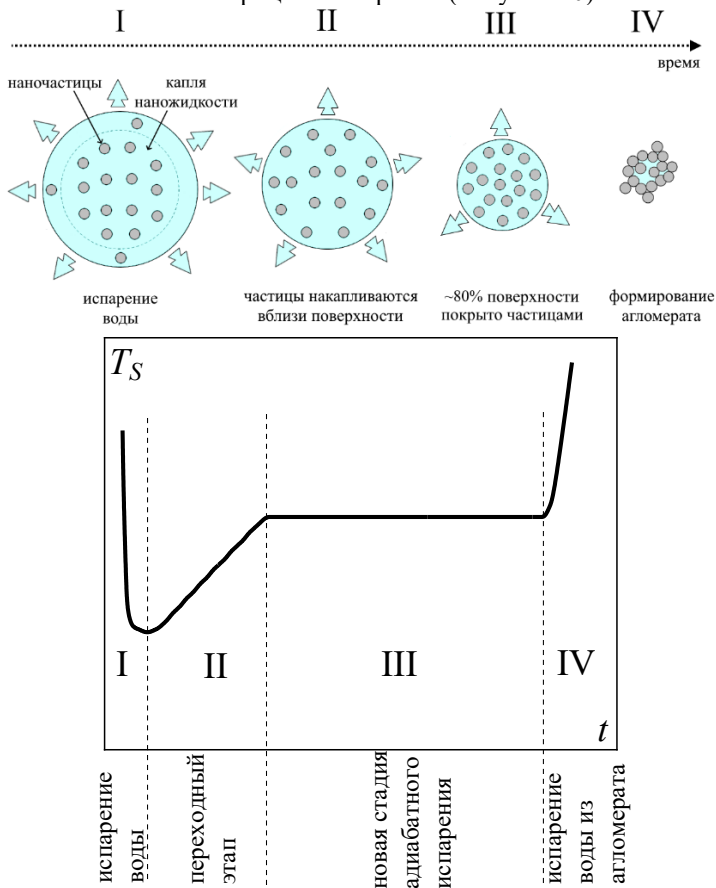


Рисунок 10 – Механизм испарения капель наножидкости.

Представлено описание предложенного механизма испарения. На первом этапе количество частиц у поверхности незначительное, поэтому происходит классическое испарение воды, при этом температура достигает адиабатического значения (Ranz, 1952). Далее по мере уменьшения размера капли происходит накопление частиц вблизи поверхности, что приводит к уменьшению потока испаряющегося вещества с поверхности. Такой процесс

влечет за собой постепенный нагрев капли. Этот процесс остановится, когда плотность частиц на регрессирующей поверхности достигнет своего насыщенного значения, что примерно составляет 80% поверхности капли. Затем образуется остов из агломерированных частиц с включениями жидкости, который будет нагреваться от державки и окружающей среды (Wei, Deng, and Chen, 2016) до полного высыхания (эти этапы не рассматриваются в данной работе).

В подтверждении вышеприведенной теории был обнаружен интересный эффект при испарении каплей наножидкостей с наночастицами оксида железа Fe_3O_4 0,1 wt % с бифильной поверхности (Рисунок 11). При испарении каплей таких жидкостей наблюдалось фольгирование поверхности, т.е. скопление частиц на межфазной границе.



Рисунок 11 – Динамика испаряющейся капли наножидкости Fe_3O_4 0,1 wt % с бифильной поверхности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработана и обоснована методология экспериментальных измерений подвешенных в потоке капель различных жидкостей. Проанализированы соотношения относительных тепловых потоков. Показано, что лучистый теплоперенос не зависит от динамики размера капли в процессе испарения. Влияние свободно-конвективных потоков максимально для больших капель, тогда как тепловой поток за счет подвеса возрастает в процессе уменьшения капли. Найден оптимум по тепловым потерям для дальнейших экспериментов.
2. Получены новые данные о динамике испарения подвешенных капель неидеального раствора этанол-вода при вариации размера и состава капель, относительной скорости обтекания их воздухом и его температуры. Проведен параметрический анализ влияния основных факторов на тепло- и массообмен в процессе испарения капель бинарных растворов. Установлено слабое влияние начальной концентрации этанола на изменение температуры поверхности капли во времени. Показано, что скорость испарения имеет немонотонный характер в зависимости от концентраций летучего компонента в растворе. При этом, численные модели расчета, основанные на решении сопряженной задачи тепломассопереноса в газовой и жидкой фазах, дают качественное согласие с результатами экспериментов.

3. Впервые получены данные о динамике испарения подвешенных капель коллоидных систем вода/наночастицы SiO_2 . Получены зависимости скорости испарения от концентрации наночастиц при различных температурах и скоростях воздуха, обтекающего каплю. Проведена аналогия эволюции температуры для бинарных смесей двух жидкостей и коллоидной системы. Показано, что при малых концентрациях наночастиц в жидкости (0,1 wt. %) испарение происходит менее интенсивно по сравнению с базовой жидкостью. В области концентраций свыше 2 wt. % обнаружено немонотонное влияние содержания наночастиц в жидкости на скорость испарения из-за сильного воздействия теплофизических свойств.
4. Предложен механизм испарения наножидкости с низкой концентрацией наночастиц. Уменьшение интенсивности испарения несущей фазы с постепенным выходом на плато обусловлено накоплением частиц вблизи поверхности, показано, что лимитирующим фактором является диффузия наночастиц в жидкости. Данный механизм может быть использован для построения физико-математических моделей.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. **Бочкарева Е.М.**, Немцев В.А., Сорокин В.В., Терехов В.В., Терехов В.И. Снижение давления пара при конденсации на холодных каплях жидкости // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89. – № 3. – С. 542-547 (из перечня ВАК).
2. **Бочкарева Е.М.**, Лей М.К., Терехов В.В., Терехов В.И. Особенности методики экспериментального исследования процесса испарения подвешенных капель жидкости // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 5. – С. 2208-2217 (из перечня ВАК).
3. **Бочкарева Е.М.**, Миськив Н.Б., Лукашов В.В. Особенности конвективной сублимации в газовых смесях // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27. – № 6. – С. 883-890 (из перечня ВАК).
4. **Bochkareva E.M.**, Miskiv N.B., Nazarov A.D., Terekhov V.V., Terekhov V.I. Experimental study of evaporating droplets suspended ethanol-water solution under conditions of forced convection // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2018. – V. 6. – №. 2. – P. 115-127 (из перечня ВАК).
5. **Starinskaya E.M.**, Miskiv N.B., Nazarov A.D., Terekhov V.V., Terekhov V.I., Rybdylova O., Sazhin S.S. Evaporation of water/ethanol droplets in an air flow: Experimental study and modelling // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 177. – P. 121502 (из перечня ВАК).
6. **Bochkareva E.M.**, Terekhov V.V., Borisov A.A., Miskiv N.B. An experimental and theoretical study of the evaporation of non-ideal solutions droplets // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 115. – P. 08010 (из перечня ВАК).

7. **Bochkareva E.M.**, Terekhov V.V., Nazarov A.D., Miskiv N.B. Integrated experimental and theoretical study of evaporation process of nonideal solutions // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 891. – P. 012010 (из перечня ВАК).
8. **Bochkareva E.M.**, Miskiv N.B., Nazarov A.D. Features of heat transfer during the evaporation of a drop of nanofluid // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1382. – P. 012105 (из перечня ВАК).
9. **Bochkareva E.M.**, Miskiv N.B., Nazarov A.D., Terekhov V.V., Terekhov V.I. An experimental study of the evaporation rate of nanofluid droplets with SiO₂ nanoparticles // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1675. – P. 012046 (из перечня ВАК).
10. **Бочкарева Е.М.**, Терехов В.В., Назаров А.Д., Миськив Н.Б. Исследование процесса испарения подвешенной капли жидкости // XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках", 22–26 мая 2017 г., г. Санкт-Петербург, Россия. – С. 292-295.
11. **Bochkareva E.M.**, Terekhov V.V., Miskiv N.B. Investigation of suspended drop evaporation of different composition of liquids // International Heat Transfer Conference 16, 10–15 August 2018, Beijing, China. – V. 18. – P. 6347-6352.