

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи

КУЗЬМЕНКОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**КИПЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СУСПЕНЗИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

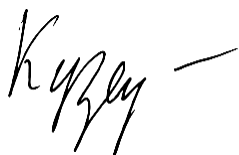
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Куценко Кирилл Владленович
кандидат технических наук, доцент

Автор:



Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель: **Куценко Кирилл Владленович**
кандидат технических наук, доцент
отделения ядерной физики и технологий
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: **Горбунов Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор
кафедры «Атомных электрических
станций» ИГЭУ им. В.И. Ленина

Дмитриев Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор
кафедры низких температур ФГБОУ ВО
«НИУ «МЭИ»

Мажукин Владимир Иванович
доктор физико-математических наук,
заведующий сектором ИПМ им. М.В.
Келдыша РАН

Защита состоится «12» октября 2022 г. в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.03» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н., доцент



Куликов Евгений Геннадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В связи с исчерпаемостью традиционных углеводородных энергоносителей весьма актуально использование возобновляемых источников энергии, из которых наиболее доступным является солнечная.

Существующие установки преобразования солнечной энергии производят примерно 900 ГВт энергии, большая часть которой (54%) приходится на установки, преобразующие энергию солнечного излучения в тепловую. К этим установкам относятся солнечные парогенерирующие установки с паротурбинным циклом производства электроэнергии. Существенным недостатком таких установок является низкая эффективность по сравнению с традиционными электростанциями. Одним из способов повышения эффективности солнечных тепловых и парогенерирующих установок является использование суспензий с диспергированными частицами нано- и микрометрового размера в качестве поглотителя солнечной энергии и теплоносителя.

Взвешенные в объеме жидкости наночастицы с размерами 10÷500 нм позволяют увеличить эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую примерно на 40%, что обусловлено существенным улучшением теплофизических и светопоглощающих свойств среды. Было показано, что теплопроводность суспензии превышает теплопроводность соответствующей базовой жидкости в 4 раза при использовании наночастиц из металлов (золото, серебро, титан, медь), оксидов металлов (железа, алюминия, титана и меди) и графита, а коэффициент поглощения излучения – на 600% и более в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,5 мкм. Вместе с тем диспергированные частицы способны служить дополнительными центрами парообразования, что приводит к увеличению скорости генерации пара.

Эффективность преобразования энергии излучения в тепловую для солнечных парогенерирующих установок зависит от типа диспергированных частиц, их концентрации и размера. Потому для создания и совершенствования таких установок необходимо провести экспериментальные и теоретические исследования по кипению суспензий под действием теплового излучения, а также разработать модель для определения скорости парообразования. Такая модель также позволит оценивать оптимальные характеристики суспензии (тип частиц, их размер и концентрация), при которых достигается наибольшая эффективность преобразования энергии излучения в тепловую.

В силу присутствия в жидкости диспергированных частиц, способных дополнительно поглощать, накапливать и передавать в жидкость энергию излучения, этот процесс качественно отличается от кипения на поверхности нагревателя. Поэтому исследование кипения мелкодисперсной суспензии под действием теплового излучения представляет отдельный интерес как с точки зрения повышения эффективности солнечных парогенерирующих установок, так и для понимания физики кипения.

Цель диссертационной работы состояла в проведении экспериментальных и теоретических исследований кипения в мелкодисперсных суспензиях под действием теплового излучения в зависимости от типа диспергируемых частиц, их размеров и концентрации, а также разработке модели для расчета скорости парообразования для определения оптимальных параметров суспензии.

Для достижения указанных целей были решены следующие задачи:

1. Получение новых экспериментальных данных по скорости образования пара в мелкодисперсных суспензиях под действием теплового излучения для различных типов твердых частиц, их концентраций и размеров.
2. Разработка новой модели роста и движения парового пузыря, образующегося на поверхности частицы, нагретой тепловым излучением, в зоне поглощения теплового излучения в мелкодисперсных суспензиях.
3. Разработка новой модели для расчета скорости образования пара при кипении мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения.
4. Получение новых экспериментальных данных по рассеянию и поглощению теплового излучения в мелкодисперсных суспензиях различных составов.
5. Разработка модели поглощения теплового излучения в мелкодисперсной суспензии, учитывающей распределение частиц по размерам.

Научная новизна работы

Впервые разработана модель для расчета скорости парообразования при кипении мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения. Новая модель позволяет определять скорость и эффективность парообразования с отклонением от экспериментальных данных не более 20%. Также новая модель применима для оценки оптимальной концентрации частиц, при которой достигается наибольшая скорость парообразования.

Созданы прототипы солнечных парогенерирующих установок для генерации электроэнергии и опреснения морской воды. Лабораторная экспериментальная установка позволяет проводить исследования в условиях замкнутого цикла конденсата пара и, таким образом, рассматривать процесс кипения суспензий в непрерывном режиме, который может использоваться в солнечных парогенерирующих установках. Прототип солнечной парогенерирующей установки позволяет изучать кипение суспензий в условиях схожих с теми, в которых работают существующие солнечные парогенерирующие установки.

Разработана новая модель роста и движения парового пузыря в зоне поглощения излучения при кипении мелкодисперсной суспензии под действием теплового излучения. Новая модель рассматривает совместное движение парового пузыря и частицы в базовой жидкости.

Разработан новый метод расчета поглощения теплового излучения в мелкодисперсной суспензии с учетом распределения частиц по размерам. Отклонение коэффициента поглощения, рассчитанного по предложенному

методу, от экспериментальных данных в два раза меньше, чем для модели, в которой взвешенные частицы считаются одинаковыми по размеру.

Практическая значимость работы

Разработанная модель для расчета скорости парообразования при кипении мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения, а также метод расчета поглощения теплового излучения в суспензии будут использованы для повышения эффективности солнечных парогенерирующих установок. Созданные прототипы позволят подобрать оптимальные режимы эксплуатации солнечных парогенерирующих установок для генерации электроэнергии и опреснения морской воды.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Новая модель для расчета скорости парообразования при кипении мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения в зависимости от типа базовой жидкости и частиц, размера и концентрации частиц. Новая модель позволяет рассчитывать скорость с отклонением от экспериментальных данных не более 20%, а также определять оптимальные тип, размер и концентрацию частиц для достижения максимальной скорости парообразования.
- Новая модель роста и движения парового пузыря, образующегося на поверхности частицы, при кипении мелкодисперсной суспензии под действием теплового излучения.
- Результаты экспериментальных исследований скорости образования пара в мелкодисперсной суспензии под действием теплового излучения в прототипе солнечной парогенерирующей установки и в лабораторной установке с замыканием цикла конденсата. Эффективность парообразования в лабораторной установке изменялась от 45 до 60% в зависимости от типа и размера используемых частиц (графитовые микрочастицы, наночастицы оксида железа и многослойные углеродные нанотрубки), что превышает эффективность установок с поверхностным поглощением излучения на 20 – 50%.
- Метод расчета поглощения теплового излучения в мелкодисперсной суспензии с учетом распределения частиц по размерам. Отклонение расчетов по предложенному методу от экспериментальных данных в два раза меньше, чем для модели, в которой взвешенные частицы считаются одинаковыми по размеру.

Достоверность полученных результатов

Полученные в работе экспериментальные данные воспроизводимы. Достоверность разработанных моделей подтверждается согласованием с экспериментальными данными, полученными в настоящей работе, и данными других авторов.

Апробация работы

Материалы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Тринадцатая Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики» (Россия, Обнинск, 2019); Международная молодежная научная школа конференция «Современные проблемы физики и

технологий» (Россия, Москва, 2019, 2020); 16th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematica (Греция, Родос, 2018); 14th International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries (Норвегия, Тронхейм, 2020); 3rd European Symposium on Nanofluids (Румыния, Яссы, 2021); Международная молодежная школа-конференция по ядерной физике и технологиям (Россия, Москва, 2020).

Личное участие автора

Работа выполнялась с 2017 г. по 2022 г. на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ. Постановка задачи исследования осуществлена совместно с научным руководителем. Разработка и модернизация экспериментальных установок, экспериментальные исследования, обобщение и анализ полученных данных, разработка моделей и методов выполнены автором самостоятельно или в соавторстве при его непосредственном участии.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертационного исследования представлены в 7 публикациях. Из них 1 работа опубликована в журналах из перечня ВАК, и 6 – в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 207 наименований, и двух приложений. Содержание диссертации изложено на 220 страницах машинописного текста, включая 62 рисунка и 11 таблиц к основному тексту и 3 рисунка и 11 таблиц к приложениям.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, обозначен личный вклад автора, кратко описаны полученные результаты, сформулированы основные положения, выносимые на защиту и приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** представлен обзор общего состояния проблемы исследования кипения мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения, а также рассмотрены вопросы применения мелкодисперсных суспензий в солнечной энергетике и опреснении. Из представленного обзора были сделаны следующие основные выводы:

- Паровые пузыри, образующиеся на поверхности наночастиц, формируют комплекс пузырь-частица, обладающий особыми теплофизическими и оптическими свойствами [1, 2].
- Добавление даже небольшого количества частиц нано- и микрометрового размера в базовую жидкость существенно усиливает поглощающие свойства теплоносителя в диапазоне длин волн от ~ 0.2 до $\sim 2,5$ мкм [3, 4].

- Распределение частиц по размерам оказывает существенное влияние на спектр экстинкции суспензий, в которых происходят процессы агломерации и фрагментации частиц [4, 5].
- Формирование паровых пузырей в суспензиях с большей вероятностью происходит на поверхности агломератов, а не на одной наночастице [1, 6].
- Кипение мелкодисперсных суспензий под действием излучения сосредоточено в области, прилежащей к облучаемой поверхности, в которой поглощается большая часть падающего излучения (зоне кипения) [6-10].
- При кипении суспензий под действием излучения эффективность парообразования может достигать 90% [6-10].
- Существует оптимальная концентрация частиц, при которой эффективность парообразования максимальна [9, 10].
- Некоторые типы частицы не уносятся с паром в конденсат [10].

В совокупности эти выводы открывают возможность создания высокоэффективных солнечных парогенерирующих установок (СПУ) на основе суспензий с объемным кипением базовой жидкости. Частицы, которые не уносятся с паром в конденсат, могут использоваться для солнечного опреснения воды. Для оценки эффективности таких солнечных парогенерирующих и опреснительных установок и определения оптимальных параметров суспензии необходимы как экспериментальные, так и теоретические исследования.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментальных исследований по кипению и по поглощению излучения суспензий различных составов. Описаны экспериментальные установки, представлены методики проведения экспериментальных исследований и обработки данных, а также результаты экспериментальных исследований.

Лабораторная экспериментальная установка (ЛЭУ) (рисунок 1) с рециркуляцией конденсата создана для исследования характеристик кипения суспензий в условиях непрерывной циркуляции конденсата. ЛЭУ состоит из двух контуров и способна работать в двух режимах: непрерывном с рециркуляцией конденсата (НР) и импульсном со сбором конденсата (ИР). Первый режим работы необходим для проведения экспериментов по кипению суспензий под действием искусственного излучения. Второй режим работы необходим для градуировки расходомера пара и для отбора проб конденсата.

Основным элементом ЛЭУ является парогенератор «1», представляющий собой прозрачную сферическую колбу объемом 1 л. Парогенератор «1» закреплялся между галогеновыми лампами мощностью 400 Вт каждая. Количество работающих ламп в исследованиях варьировалось от 2 до 5.

При проведении экспериментов в непрерывном режиме пар, образующийся в результате кипения суспензии, направлялся в конденсатор «5» через расходомер «4». Охлаждение и конденсация пара в конденсаторе «5» происходили за счет циркуляции воды второго контура, оборудованного

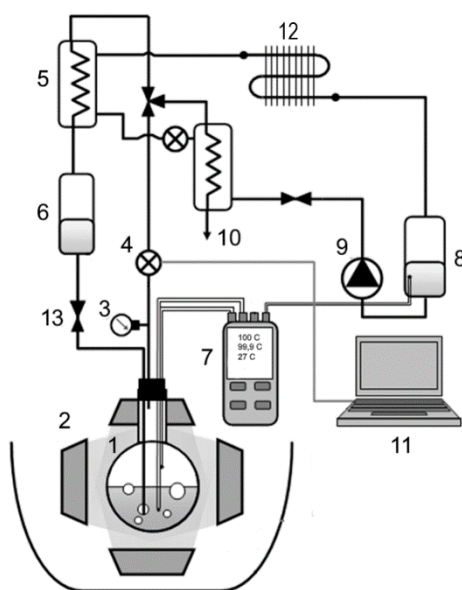


Рисунок 1 – Схема лабораторной экспериментальной установки: 1 – парогенератор; 2 – галогеновые лампы; 3 – манометр; 4 – расходомер пара; 5 – конденсатор; 6 – расширительный бак; 7 – регистратор измерений термопар; 8 – бак воды второго контура; 9 – насос; 10 – конденсатор; 11 – компьютер; 12 – воздушный радиатор второго контура; 13 – обратный клапан

воздушным радиатором «12», баком «8» и циркуляционным насосом «9». Конденсат направлялся в расширительный бак «6» и затем возвращался обратно в парогенератор «1» за счет гидростатического давления. Трубка, соединяющая расширительный бак «6» и парогенератор «1», была оборудована обратным клапаном «13» во избежание попадания пара напрямую в расширительный бак «6». В ходе экспериментов объем образца суспензии в парогенераторе «1» сохранялся примерно постоянным (500 мл).

Непрерывный режим работы достигался спустя примерно 40 минут после включения ламп. Этот режим характеризовался постоянными уровнем и температурой конденсата в расширительном баке «6». При этом температура суспензии в парогенераторе «1» была близка к температуре насыщения воды при атмосферном давлении. Измерения расхода пара выполнялись в непрерывном режиме работы установки.

В непрерывном режиме работы ЛЭУ были проведены эксперименты по кипению суспензий различных составов под действием

искусственного излучения. Для оценки влияния наночастиц на процесс кипения аналогичные эксперименты также проводились для базовой жидкости. В этом случае парогенератор «1» заменялся на эквивалентную по форме и размерам колбу, внешняя поверхность которой была зачернена – завернута в металлическую фольгу и покрыта тремя слоями графитовой краски.

В импульсном режиме работе установки пар, образующийся в парогенераторе «1», через расходомер «4» направлялся в конденсатор «10», который охлаждался водой второго контура. Затем конденсат собирался в емкость для его последующего анализа на водородный показатель pH, соленость S, общую минерализацию и электропроводность.

Прототип СПУ был создан на основе зеркального солнечного концентратора Solar CR-3. Основные характеристики зеркального солнечного концентратора представлены в таблице 1.

Солнечный концентратор оснащен электронной системой солнечного слежения. Система слежения приводит в движение приводы, вращающие зеркальную поверхность по двум осям: вертикальной и горизонтальной. Контроллер системы слежения считывает показания пиранометров, расположенных на каркасе крепления зеркал. В случае облачной погоды активировалась вспомогательная система слежения, основанная на загруженной в память контроллера траектории Солнца.

Таблица 1 – Основные характеристики зеркального солнечного концентратора Solar CR-3

Параметр	Значение
Общая площадь зеркальной отражающей поверхности, м ²	5
Максимальное усиление солнечного излучения	240
Площадь фокусной зоны отражающей поверхности, см ²	208
Геометрия рабочего участка для размещения в фокусной зоне – диаметр, мм – высота, мм	цилиндр 150-300 250-400
Максимальная масса рабочего участка, кг	4
Максимально допустимая скорость ветра, м/с	25
Максимальная потребляемая мощность, Вт	20

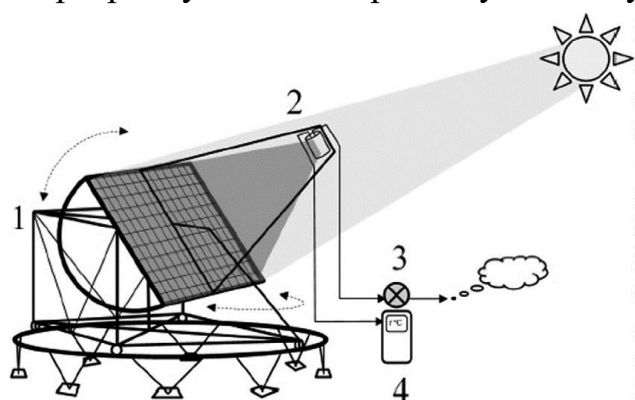


Рисунок 2 – Схема прототипа солнечной парогенерирующей установки: 1 – зеркальный солнечный концентратор Solar-CR3; 2 – парогенератор; 3 – расходомер; 4 – измеритель температуры

Схема прототипа СПУ показана на рисунке 2. В фокусной зоне солнечного концентратора «1» размещался парогенератор «2», представляющий собой прозрачную цилиндрическую колбу объемом 3 литра. Парогенератор «2» заполнялся 2 кг исследуемой суспензией. Пар, образующийся в парогенераторе «1», имел выход на атмосферу через расходомер «3». Эксперименты на прототипе СПУ проводились на открытом воздухе в конце августа 2019 г. в Москве при температуре воздуха от 19 до 25 °С и относительной влажности 53÷87%.

С помощью ЛЭУ и прототипа СПУ были проведены эксперименты по кипению суспензий различных составов (таблица 2).

Таблица 2 – Установки и исследуемые суспензии

№ п/п	Установка	Базовая жидкость	Тип частиц	Размер частиц в сухом порошке, нм	Размер агломератов, мкм	Концентрация, масс. %
1	ЛЭУ (НР)	ДВ ^[1]	Графит	10,6·10 ³	16,8÷18,7	от 0,1 до 14
2	ЛЭУ (НР) и прототип СПУ	ДВ	Fe ₃ O ₄	110	2	от 0,5 до 5
3	ЛЭУ (НР)	ДВ с морской солью (s = 35 г/л), вода из Балтийского моря (солю s = 4,23 г/л)	МУНТ ^[2]	Диаметр 49 и 72; длина ≥5·10 ³	-	от 1 до 5
			Fe ₃ O ₄	110	2	от 0,5 до 5
			Паста NT AQUA ^[3]	Диаметр 49 и 72; длина ≥5·10 ³	-	от 1 до 10
4	ЛЭУ (ИР)	ДВ с морской солью (s = 35 г/л),	Fe ₃ O ₄	110	-	от 0,5 до 2

^[1] ДВ – дистиллированная вода;

^[2] МУНТ – многослойные углеродные нанотрубки;

^[3] Паста NT AQUA - высококонцентрированная смесь на основе МУНТ с добавлением вспомогательных компонентов

Для приготовления суспензии использовался двухшаговый метод. Сухой порошок частиц добавлялся в базовую жидкость, и затем суспензия перемешивалась с помощью ультразвуковой ванны или гомогенизатора в течение 30-60 минут.

Для оценки эффективности кипения суспензии под действием излучения широко используется эффективность парообразования [6-10]. В стационарном случае эффективность парообразования определяется выражением:

$$\eta = \frac{r_{lv} G_m}{q F_{ir}}, \quad (1)$$

где G_m – массовая скорость образования пара [кг/с], r_{lv} – удельная теплота парообразования, F_{ir} – площадь облучаемой поверхности суспензии, q – плотность лучистого теплового потока.

По результатам экспериментальных исследований по кипению суспензий под действием излучения были сделаны следующие основные выводы:

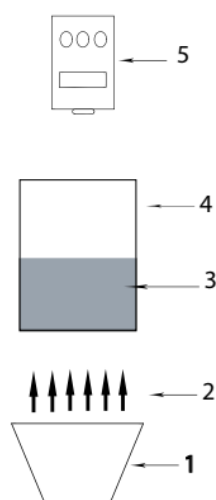
- существует оптимальная концентрация частиц, при которой скорость и эффективность парообразования максимальны. Этот оптимум обусловлен тем, что при увеличении концентрации частиц увеличивается коэффициент поглощения излучения и количество потенциальных центров парообразования, но уменьшается толщина зоны кипения. В зависимости от типа и размеров частиц оптимум изменялся от 1 масс. % (для графитовых микрочастиц) до 3 масс. % (для наночастиц Fe_3O_4);
- при оптимальной концентрации частиц эффективность парообразования суспензии в прозрачном парогенераторе превосходит эффективность парообразования в зачерненном парогенераторе в 2 раза для микрометровых графитовых частиц и на 28% для наночастиц Fe_3O_4 ;
- для экспериментов на прототипе СПУ наибольшую эффективность парообразования (60%) продемонстрировала суспензия с добавлением 0,5 масс. % наночастиц Fe_3O_4 , при которой скорость парообразования составляла примерно $35,7 \pm 0,8$ г/мин против $29 \pm 0,6$ г/мин, полученных при кипении дистиллированной воды в эквивалентном зачерненном объеме. Были проведены тестовые измерения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, которая достигала 1,5% при избыточном давлении в парогенераторе не более 0,4 бар.
- в непрерывном режиме ЛЭУ наибольший прирост в эффективности парообразования (36%) относительно соленой воды в зачерненном парогенераторе наблюдался для суспензий с МУНТ при концентрации 5 масс. %;
- все рассмотренные типы частиц формируют в суспензии на основе воды агломераты микрометрового размера. Кипение и последующая выдержка суспензий в течение нескольких суток приводят к повышению среднего размера агломератов и снижению эффективной концентрации суспензии вследствие выпадения осадка. Агломераты наночастиц Fe_3O_4 увеличивались с 2 до 8 мкм, а графитовых микрочастиц – с $16,8 \div 18,7$ до $27,5 \div 30,5$ мкм;

- в импульсном режиме при кипении суспензий на основе соленой воды с наночастицами Fe_3O_4 средняя скорость парообразования слабо зависит от концентрации частиц, изменяясь от 4,5 до 4,8 г/мин, что превосходит соответствующий показатель при кипении базовой жидкости в зачерненном парогенераторе на 36%;

Экспериментальное исследование поглощения излучения галогеновых ламп для суспензий различных составов: на основе дистиллированной воды с добавлением наночастиц Fe_3O_4 с концентрацией от 0 до 2 масс. % и на основе смеси дистиллированной воды, этилового спирта, додецилсульфата натрия (ДСН) и пеногасителя Керхер (базовая смесь) с добавлением МУНТ с концентрацией от 0 до 1 масс. %.

Суспензии на основе базовой смеси и МУНТ изготавливались двухшаговым методом. В герметичную емкость добавлялись все компоненты будущей пробы суспензии, затем контейнер помещался в ультразвуковую ванну на 30 минут. Спустя сутки после приготовления суспензии проводился анализ распределения размеров агломератов частиц методом корреляционной лазерной спектроскопии. Для каждой суспензии выполнялось два последовательных измерения с интервалом не более 10 минут.

В приготовленных образцах суспензий наблюдалось образование осадка. В среднем в осадок выпадала примерно половина массы частиц. После



*Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента по ослаблению искусственного излучения при прохождении через слой суспензии:
1 – галогеновая лампа,
2 – падающее излучение, 3 – образец суспензии; 4 – колба,
5 – измеритель мощности излучения*

извлечения осадка дальнейшего оседания частиц не наблюдалось. Таким образом, конечная концентрация суспензий на основе базовой смеси с МУНТ составляла примерно половину от начальной.

Схема эксперимента представлена на рисунке 3. Исследуемый образец суспензии размещался в стеклянной цилиндрической плоскодонной колбе. Высота столба суспензии в объеме варьировалась от 0 до 200 мм. Колба облучалась галогеновой лампой «1»

мощностью 400 Вт.

Измерение мощности излучения, прошедшего через слой суспензии, выполнялось при помощи измерителя мощности LS122 IR и пиранометра SP Lite 2. Используемый измеритель мощности регистрирует излучение в диапазоне длин волн от 1000 до 1700 нм, а пиранометр – от 400 до 1100 нм.

Результаты измерения доли поглощенного в суспензии излучения представлены на рисунках 4 и 5. Из рисунка 4 видно, что ослабление излучения лампы для воды или смесей без добавления частиц в диапазоне длин волн 1000-1700 нм (А) происходит быстрее, чем в 400-1100 нм (Б). Это объясняется тем, что коэффициент поглощения излучения воды в инфракрасной области существенно выше, чем в видимой области излучения. Анализ

экспериментальных данных показал, что оптическая плотность суспензии возрастает нелинейно с ростом концентрации частиц из-за неприменимости закона Бугера-Ламберта-Бера к немонахроматическому излучению.

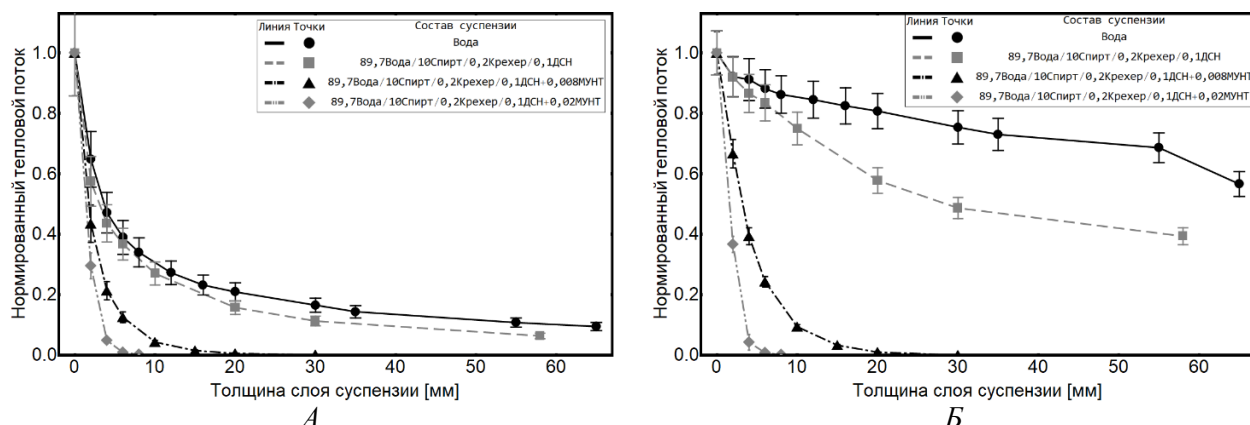


Рисунок 4 – Зависимости нормированного теплового потока от толщины слоя суспензии. Измерения выполнены для суспензий на основе базовой смеси и МУНТ в диапазонах длин волн от 1000 до 1700 нм (А) и от 400 до 1100 нм (Б)

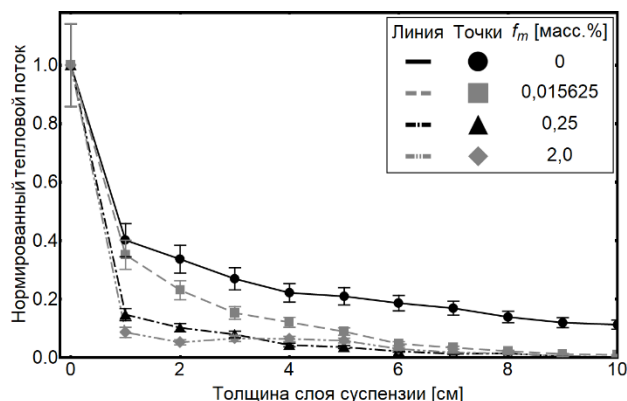


Рисунок 5 – Зависимости нормированного теплового потока от толщины слоя суспензии. Измерения выполнены для суспензий на основе дистиллированной воды и наночастиц оксида железа в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,7 мкм

Помимо доли поглощенного излучения также измерялась спектральная оптическая плотность образцов суспензий с помощью спектрофотометра Cary 100 Scan UV-Visible, которая в дальнейшем была использована для проверки модели поглощения излучения в суспензиях.

В третьей главе предложена модель роста и движения парового пузыря, образующегося на поверхности частицы (агломерата частиц), и модель для расчета скорости парообразования при кипении суспензий под действием излучения. Также в главе представлены результаты сравнения моделей с экспериментальными данными.

Важнейшим параметром предлагаемых моделей является толщина зоны кипения. Эта толщина пропорциональна толщине слоя суспензии, при прохождении через который поглощается большая часть падающего излучения. Полагая, что коэффициент экстинкции суспензии не зависит от длины волны падающего излучения, получена простая оценка толщины зоны кипения:

$$l = (\overline{\alpha_{bf}} + 6f_v/d_p)^{-1}, \quad (2)$$

где $\overline{\alpha_{bf}}$ – коэффициент экстинкции базовой жидкости, осредненный в рассматриваемом диапазоне длин волн, f_v – объемная концентрация частиц, d_p – характерный линейный размер агломератов частиц (диаметр).

Для оценки скорости роста парового пузыря был использован подход, предложенный в [12], согласно которому начальный размер парового пузыря равен характерному линейному размеру агломератов d_p (рисунок 6). По мере роста паровой пузырь достигает размера среднего расстояния Δl_p между частицами, соприкасается и слипается с соседним паровым пузырем. В дальнейшем паровой пузырь продолжает расти и двигаться, что приводит к его уходу из зоны кипения. Моментом выхода из зоны кипения τ_{es} считается соприкосновение поверхности пузыря с границей зоны кипения. Предполагалось, что кипение происходит в насыщенной жидкости, и паровой пузырь после выхода из зоны кипения не изменяет своих размеров. Зная время, которое требуется паровому пузырю для выхода из зоны кипения и его диаметр в этот момент можно оценить скорость парообразования. При этом не учитывается испарение базовой жидкости со свободной поверхности.

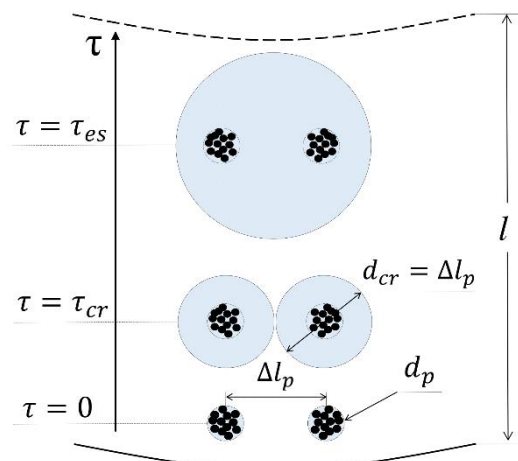


Рисунок 6 – Схематичное изображение роста парового пузыря в зоне кипения

Характерное время роста и размер парового пузыря определялись моментом соприкосновения двух соседних пузырей (критическое время τ_{cr} и критический диаметр d_{cr}) и использовались для оценки скорости роста пузыря.

Для определения критического времени и критического диаметра пузыря были использованы два подхода: уравнение теплового баланса для комплекса пузырь-частица (Н) и решение Микича уравнения Рэлея-Плессета (М) [12], описывающего рост парового пузыря в гомогенной равномерно перегретой жидкости. Движение парового пузыря определялось из уравнения динамики с учетом сил гравитации, подъемных архимедовых, термофореза и лобового сопротивления. Для сравнения также были предложены модели, не учитывающие рост парового пузыря. В этом случае паровой пузырь оставался неподвижным и по мере роста слипался с пузырями, захватывая соседние агломераты частиц. Время выхода из зоны кипения также определялось по касанию поверхности пузыря границы зоны кипения.

Таким образом, было рассмотрено четыре модели роста и движения парового пузыря. В таблице 3 приведены краткая характеристика каждой модели и ее условное обозначение.

Таблица 3 – Краткие характеристики и условные обозначения моделей роста и движения парового пузыря

Модель / Характеристика	Способ расчета критического времени	Учет движения
Н-модель	Уравнение теплового баланса	нет
М-модель	Решение Микича	нет
НМ-модель	Уравнение теплового баланса	да
ММ-модель	Решение Микича	да

Было выполнено сравнение предложенных моделей с экспериментальными данными, полученными в первой серии экспериментов (1) (см. таблицу 2) для суспензий на основе дистиллированной воды с графитовыми микрочастицами. Результаты сравнения представлены на рисунке 7.

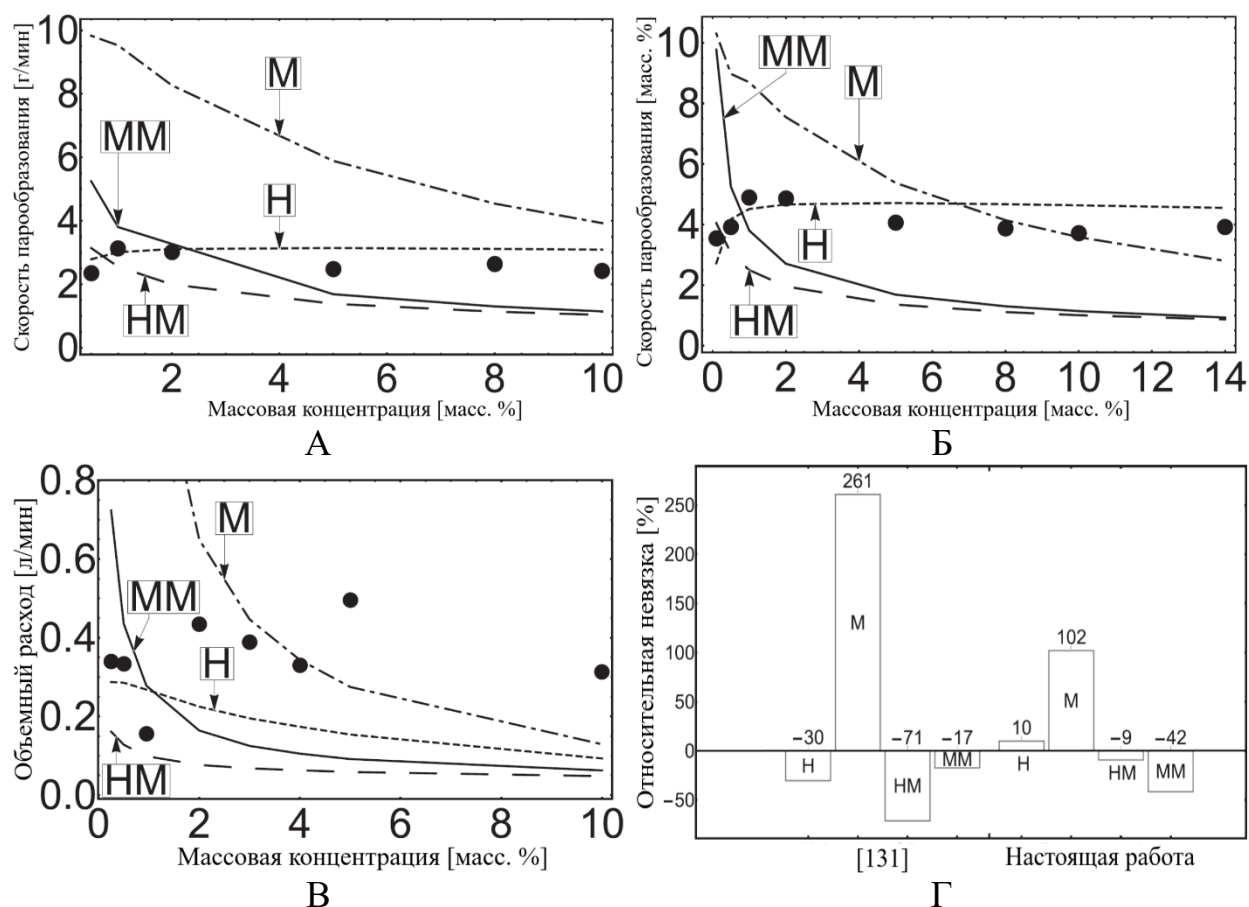


Рисунок 7 - Сравнение результатов расчетов по модели роста и движения парового пузыря с экспериментальными данными (1), полученными при облучении водной суспензии с микрочастицами графита двумя (А) и тремя (Б) лампами, а также с данными из работы [13] (В). Г – гистограмма средних относительных невязок по каждой модели в сравнении с экспериментальными данными. Обозначения расчетных кривых сделаны согласно таблице 3

Из рисунка 7 видно, что наибольшей точностью по сравнению с экспериментальными данными обладает Н-модель, в рамках которой не рассматривается движение паровых пузырей, и критическое время оценивается из теплового баланса. Кривая скорости парообразования, полученная с помощью Н-модели, имеет максимум, положение которого примерно совпадает с экспериментальными результатами. На основании этого подхода была разработана модель для расчета скорости парообразования в суспензии под действием теплового излучения.

Модель для расчета скорости парообразования основана на тех же предположениях, что и модель роста, однако не учитывает движение пузыря в зоне кипения. В качестве критического диаметра парового пузыря принималась толщина зоны кипения (2). В этом случае доля пара в зоне кипения может быть оценена как соответствующий объем жидкости с поправкой на плотность упаковки сфер. Тогда, разделив объем пара в зоне кипения на критическое время

роста, определяемое по уравнению теплового баланса, можно получить следующее выражение для скорости парообразования:

$$G_m = \frac{qF_{ir}}{r_{lv}} \frac{2\pi\sqrt{3}}{3} \varphi(1 - f_v) \left[\gamma Ja_p + \frac{1 - f_v}{f_v} (1 + Ja) + \chi \left(6 + \frac{2}{f_v \varphi} + \frac{4}{\varphi} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока на поверхности суспензии; F_{ir} – площадь облучаемой поверхности; r_{lv} – теплота парообразования базовой жидкости, φ – отношение критического диаметра парового пузыря к среднему диаметру частиц, $\varphi = l/d_p$; γ – отношение плотности частиц ρ_p к плотности пара ρ_v , $\gamma = \rho_p/\rho_v$; Ja_p – модифицированное число Якоба, $Ja_p = C_p \Delta T / r_{lv}$; C_p – удельная теплоемкость частиц; ΔT – перегрев, необходимый для начала образования пузырьков пара, $\Delta T = T_{sat}(p_v) - T_\infty$; T_{sat} – температура насыщения базовой жидкости; T_∞ – температура суспензии за пределами зоны кипения; p_v – избыточное давление внутри пузыря с диаметром равным диаметру частицы, $p_v = p_\infty + 4\sigma/d_p$; Ja – число Якоба, $Ja = C_l \Delta T / r_{lv}$; C_l – удельная теплоемкость базовой жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения, χ – безразмерный критерий, характеризующий отношение энергии, затраченной на формирование поверхностей раздела парового пузыря, к энергии на испарение $\chi = \sigma / (\rho_v d_p r_{lv})$.

Выражение (3) может быть переписано в терминах эффективности парообразования согласно формуле (1). Важно отметить, что формула (3) применима только в случае установившегося режима кипения при постоянном объеме суспензии и концентрации частиц. Реализовать эти условия можно в случае замыкания цикла конденсата. Проверка модели была выполнена по экспериментальным данным серий 2 и 3 (рисунки 8 и 9).

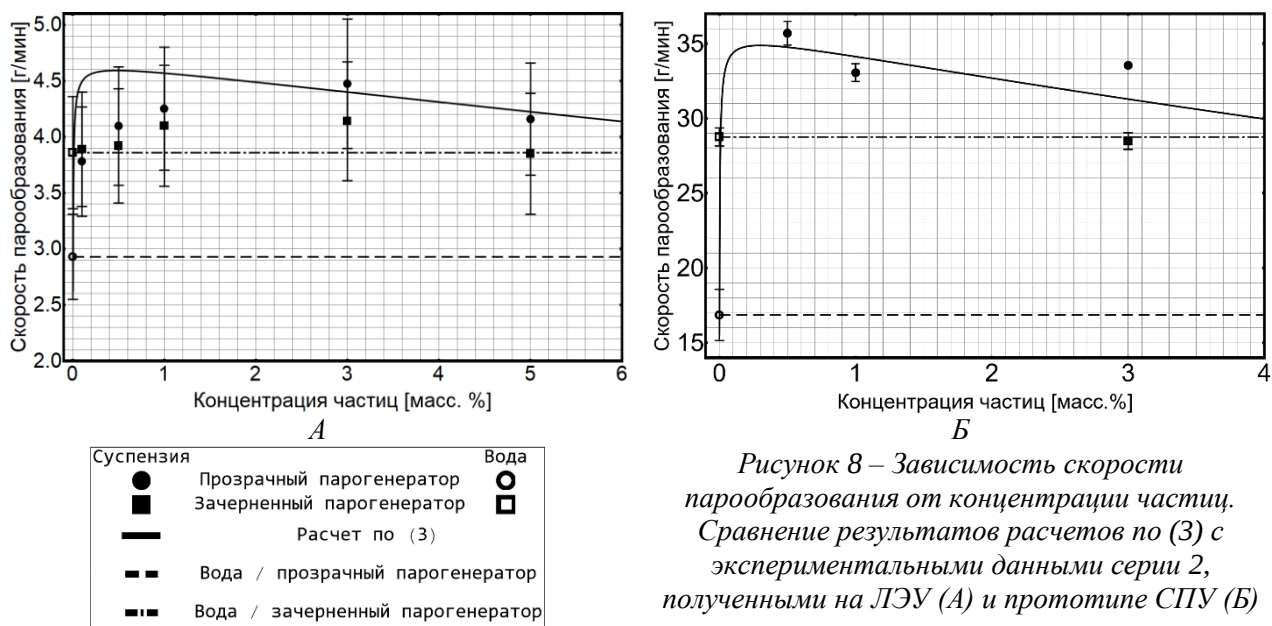
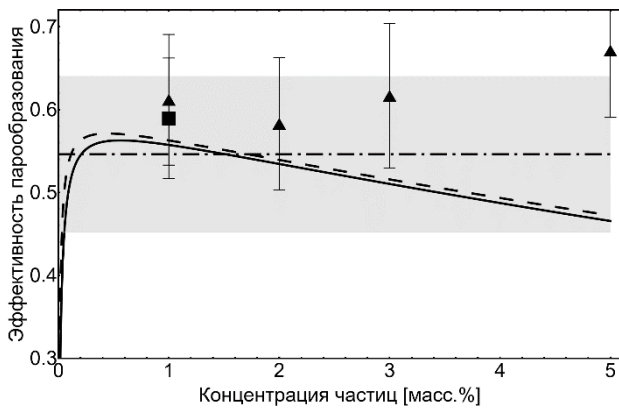


Рисунок 8 – Зависимость скорости парообразования от концентрации частиц. Сравнение результатов расчетов по (3) с экспериментальными данными серии 2, полученными на ЛЭУ (А) и прототипе СПУ (Б)

Из рисунков 8 и 9 видно, что модель хорошо описывает экспериментальные данные: среднее отклонение результатов расчетов по (3) от экспериментальных данных составляет 10,5% при максимальном 19%. Отклонения расчетной кривой от экспериментальных данных на рисунке 8 обусловлены относительной погрешностью определения плотности теплового потока q (10%). Отклонения от экспериментальных данных на рисунке 9А, по всей видимости, обусловлены тем, что форма МУНТ существенно отличается от сферической, что затрудняет оценку диаметра агломератов.



- Солёная вода / расчет по (3)
- - - Дистиллированная вода / расчет по (3)
- ▲ Солёная вода
- Дистиллированная вода
- ■ Солёная вода / Зачерненная колба
- ■ Погрешность солёная вода в зачерненной колбе

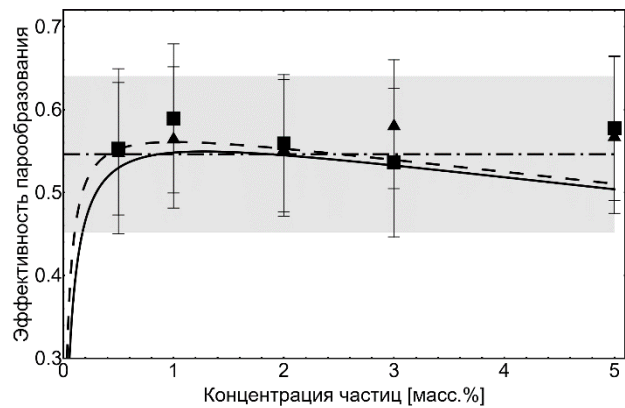


Рисунок 9 – Зависимость эффективности парообразования от концентрации частиц. Сравнение результатов расчетов по (3) с экспериментальными данными серии 3 по кипению суспензий на основе дистиллированной и соленой воды с добавлением МУНТ (А) и наночастиц оксида железа (Б)

Как упоминалось ранее, формула (3) применима только для установившегося режима кипения при постоянном объеме суспензии и концентрации частиц. Однако предложенная модель может быть обобщена на случай нестационарных процессов, сопровождающихся изменением объема базовой жидкости и концентрации частиц. Для этого необходимо учесть изменение объема суспензии V_s , полагая, что частицы не уносятся вместе с паром и испарение базовой жидкости происходит достаточно медленно. В этом случае можно составить систему дифференциальных уравнений, описывающую изменение концентрации частиц f_v , солёности s и температуры T_∞ :

$$\frac{df_v}{dt} = f_v^2 \frac{G_m(f_v)}{\rho_{bf} f_{v0} V_0}, \quad (4)$$

$$\frac{ds}{dt} = s^2 \frac{G_m(f_v, s)}{s_0 V_0 (1 - f_{v0}) \rho_{sw}(s_0)} \quad (5)$$

$$\rho_{bf} C_{bf} V_s \frac{dT_\infty}{dt} + \rho_{bf} C_{bf} T_\infty \frac{dV_s}{dt} = q F_{ir} - h F_{sur} (T_\infty - T_{sur}) - \varepsilon \sigma_b F_{sur} (T_\infty^4 - T_{sur}^4) - r_{lv} G_m \quad (6)$$

где f_{v0} , V_0 и s_0 – начальные концентрация частиц, объем суспензии и солёность соответственно; ρ_{bf} и ρ_{sw} – плотность базовой жидкости и соленой воды соответственно; C_{bf} – теплоемкость базовой жидкости; h – коэффициент

теплопередачи от суспензии к окружающей среде; T_{sur} – температура окружающей среды; ε – степень черноты поверхности парогенератора; σ_b – постоянная Стефана-Больцмана.

При необходимости система уравнений (4)-(6) может быть дополнена уравнениями, учитывающими зависимость свойств суспензии от температуры, концентрации и солёности, изменение площади контакта суспензии с парогенератором и прочих параметров.

С учетом системы уравнений (4)-(6), модель для расчета скорости парообразования (3) была использована для описания экспериментов в импульсном режиме работы ЛЭУ по кипению суспензий на основе соленой воды с добавлением наночастиц Fe_3O_4 (3 по таблице 2). Результаты сравнения расчетов по модели с экспериментальными данными представлены на рисунке 10.

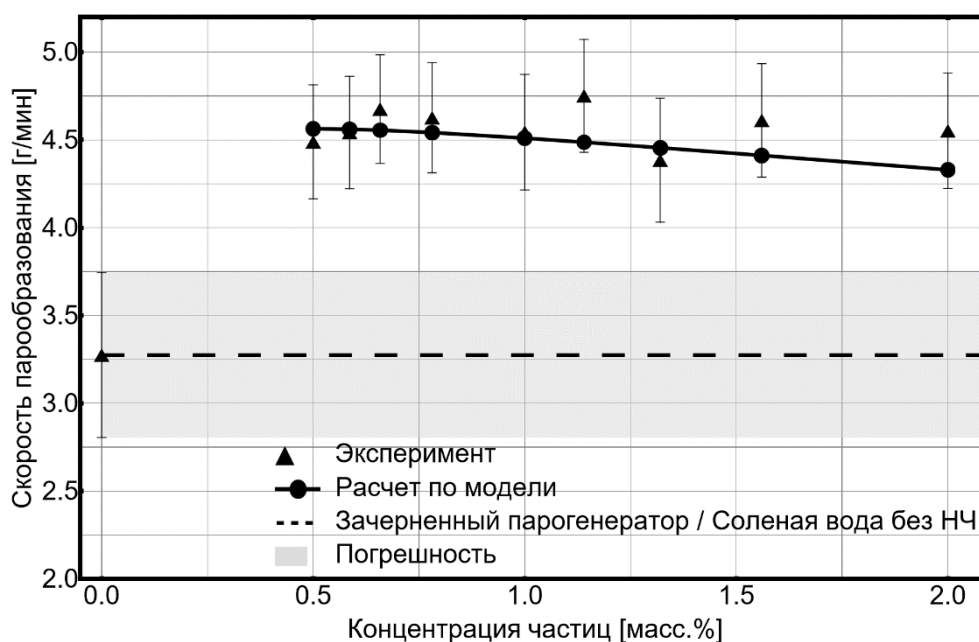


Рисунок 10 - Зависимость средней скорости парообразования от концентрации частиц. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по модели

Результаты расчетов по предложенной модели хорошо описывают экспериментальные данные автора и данные из работ [7-10]. В качестве примера на рисунке 11 представлено сравнение результатов расчетов с данными из работы [9]. Расчет с 25-й минуты после начала облучения обусловлен тем, что на начальном этапе определяющий вклад в парообразование вносит испарение со свободной поверхности, а вклад кипения незначителен.

Всего для валидации модели был рассмотрен набор из 478 экспериментальных точек, включающих как данные полученные в настоящей работе (32 точки), так и данные из работ [7-10] (446 точек). По итогам сравнения со всеми рассмотренными данными среднее отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных составило 4,5% при максимальном отклонении не более 20%. Таким образом, предложенная модель способна описывать скорость и эффективность парообразования при кипении суспензии под действием излучения.

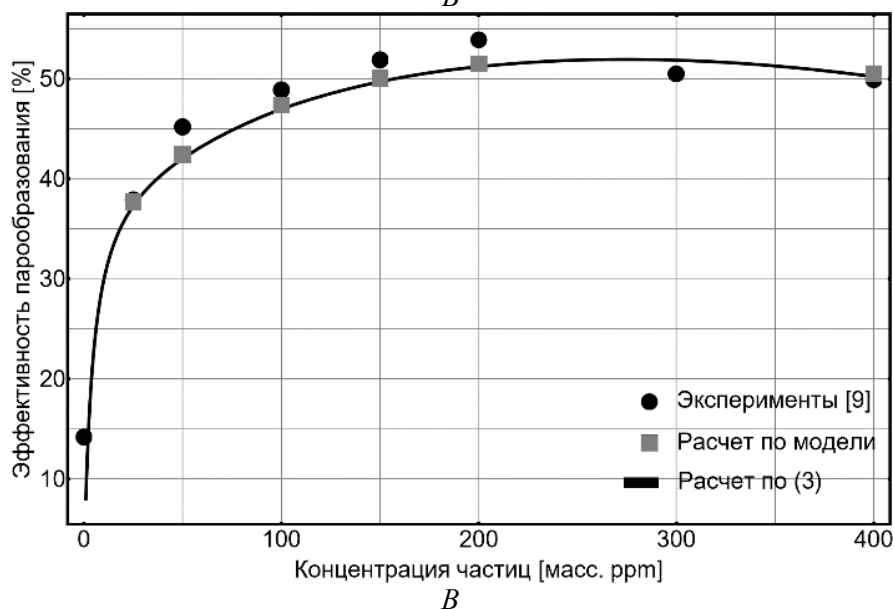
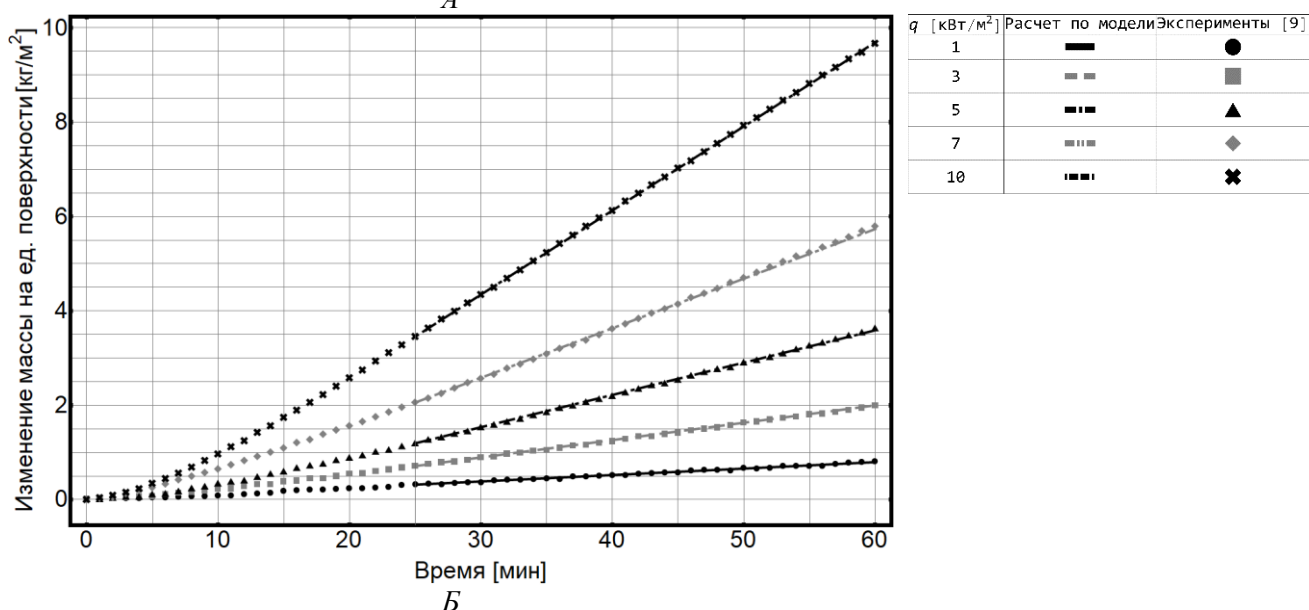
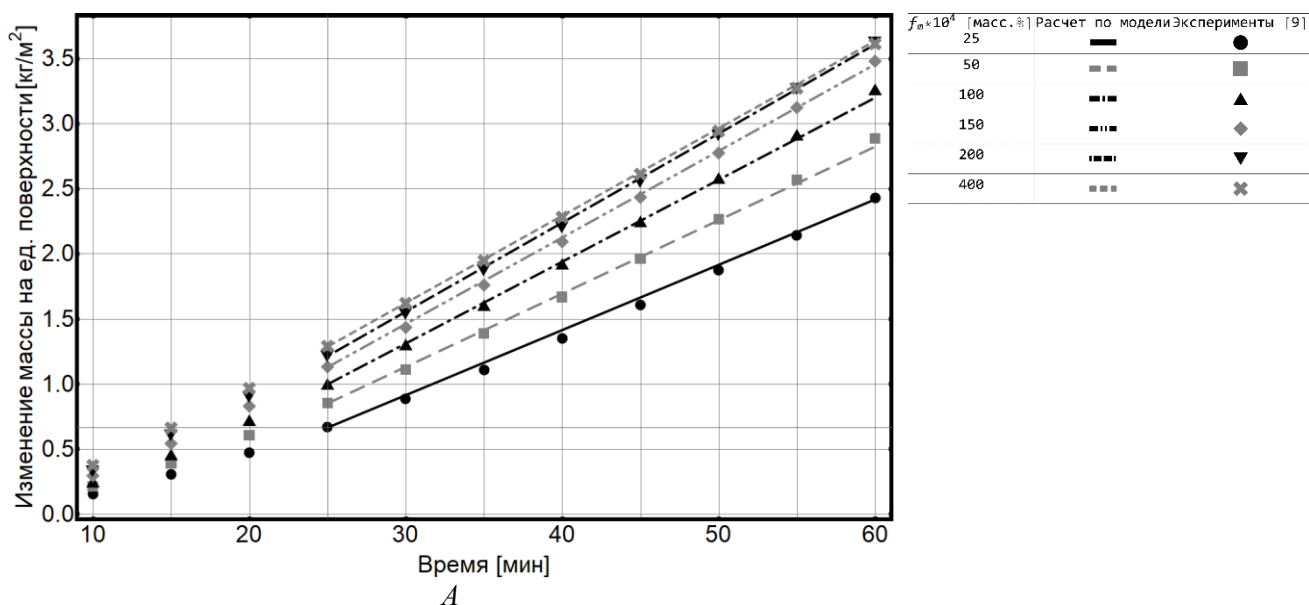


Рисунок 11 – Зависимость испаренной массы на единицу поверхности испарения от времени при тепловом потоке 5 кВт/м² для различных концентраций частиц (А) и при концентрации 0,02 масс. % для различных тепловых потоков (Б), а также зависимость эффективности парообразования (1) от концентрации частиц (В). Сравнение расчетов по модели с экспериментальными данными из работы [9]

Толщина зоны кипения, которая является одним из ключевых параметров модели для расчета скорости парообразования, определяется светопоглощающими свойствами суспензии, которые существенно зависят от распределения частиц по размерам (РЧР). Таким образом, для уточнения предложенной модели необходимо учесть поглощение излучения при известных РЧР.

В четвертой главе предложен метод расчета спектра поглощения суспензии с учетом распределения частиц по размерам. Данный метод может быть использован для оценки толщины зоны кипения.

Толщина зоны кипения может быть вычислена в предположении независимого рассеяния с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера при известном спектре экстинкции суспензии для диапазона длин волн падающего излучения.

Модель поглощения теплового излучения в суспензиях основана на совместном применении теории рассеяния Рэлея, теории Ми и методов геометрической оптики для сферических частиц. Эффективность экстинкции частицы в зависимости от значения параметра дифракции x , характеризующего характерный линейный размер частиц относительно длины волны, рассчитывалась с использованием одного из следующих подходов:

- при $x \leq 0,1$ используется теория рассеяния Рэлея;
- при $0,1 < x \leq 10$ – теория Ми;
- при $x > 10$ – методы геометрической оптики.

В результате эффективность экстинкции частицы определялась следующим образом [11]:

$$Q_{ext} = \begin{cases} 4x \operatorname{Im} \left[\frac{m_p^2 - 1}{m_p^2 + 2} \left[1 + \frac{x^2}{15} \left(\frac{m_p^2 - 1}{m_p^2 + 2} \right) \frac{m_p^4 + 27m_p^2 + 38}{2m_p^2 + 3} \right] \right] + \frac{8}{3} x^4 \operatorname{Re} \left[\left(\frac{m_p^2 - 1}{m_p^2 + 2} \right)^2 \right], & x \leq 0,1 \\ \frac{2\pi}{x^2} \sum_{i=1}^{\infty} (2i + 1) \operatorname{Re}\{a_i + b_i\}, & 0,1 < x \leq 10 \\ 1, & x > 10 \end{cases}, \quad (7)$$

где x – параметр дифракции, $x = \pi n_{bf} d_p / \lambda$; m_p – комплексный показатель преломления частиц относительно базовой жидкости; n_{bf} – показатель преломления базовой жидкости, d_p – диаметр частиц; a_i и b_i – коэффициенты рассеянного поля.

В инфракрасной области спектра базовая жидкость может существенно поглощать излучение, поэтому при расчете коэффициента экстинкции суспензии α_s необходимо учитывать поглощение в базовой жидкости [4]:

$$\alpha_s = \frac{3}{2} \frac{f_v}{d_p} Q_{ext} + (1 - f_v) \alpha_{bf}, \quad (8)$$

где α_{bf} – коэффициент экстинкции базовой жидкости, $\alpha_{bf} = 4\pi k_{bf}/\lambda$ [11], k_{bf} – показатель поглощения базовой жидкости.

Для учета РЧР коэффициент экстинкции суспензии (8) осредняется по относительной объемной доле частиц $f_{v.i}/f_v$, имеющих размер $d_{p.i}$:

$$\overline{\alpha_s} = \sum_{i=1}^N \alpha_s(d_{p.i}) f_{v.i}/f_v. \quad (9)$$

Объемная доля частиц $f_{v.i}/f_v$, имеющих определенный размер, может быть определена с помощью гранулометрического анализа суспензии.

Модель поглощения излучения в суспензии была сравнена с экспериментальными данными по поглощению монохроматического излучения в суспензиях различного состава с добавлением МУНТ. Пример сравнения результатов расчетов по модели с экспериментальными данными, полученными на спектрофотометре, представлен на рисунке 12. Измерения выполнялись для суспензии на основе смеси дистиллированной воды, этилового спирта (10 масс. %), ДСН (0,1 масс. %) и пеногасителя Керхер (0,2 масс. %) с МУНТ с начальной концентрацией 0,008 масс. %. После выдержки в течение 24 часов в суспензии выпадал осадок из агломератов частиц, при этом концентрация частиц уменьшалась примерно в 2 раза по сравнению с начальной. Серая область на рисунке 12 соответствует неопределенности расчета конечной концентрации.

Расчет по модели без учета РЧР (монодисперсная модель) был выполнен для осредненного по объемной доле размера частиц $\overline{d_p}$:

$$\overline{d_p} = \sum_{i=1}^N d_{p.i} f_{v.i}/f_v. \quad (10)$$

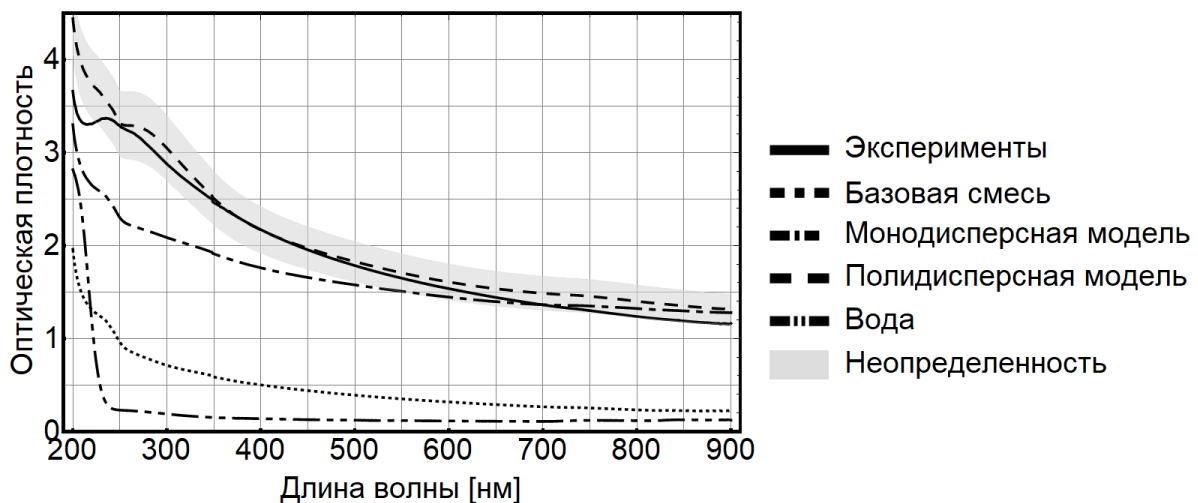


Рисунок 12 – Зависимость оптической плотности суспензии от длины волны для концентраций частиц 0,004 масс. %. Сравнение экспериментальных данных для суспензий на основе базовой смеси с МУНТ с расчетами по моделям, учитывающей и учитывающая РЧР (красная пунктирная линия). Для сравнения приведена оптическая плотность базовой смеси и дистиллированной воды

Для расчетов, учитывающих РЧР (полидисперсная модель), использовались данные гранулометрического анализа суспензии.

Как видно из рисунка 12, учет распределения частиц по размерам существенно увеличивает точность определения коэффициента экстинкции суспензии по сравнению с монодисперсной моделью. Так среднее отклонение расчетов по (9) от экспериментальных данных составляет 6,6%, а для монодисперсной модели (8) – 12,6%.

Результаты расчетов по монодисперсной модели занижены по сравнению с экспериментальными данными и моделью, учитывающей РЧР. Это обусловлено усреднением размеров частиц и соответствующим исключением из расчета частиц малых размеров, которые лучше поглощают и рассеивают коротковолновое излучение в видимой части спектра. Модель, учитывающая РЧР, позволяет рассмотреть вклад всех частиц в поглощение излучения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана модель для расчета скорости парообразования при кипении мелкодисперсных суспензий под действием теплового излучения. Новая модель позволяет определять скорость и эффективность парообразования в суспензиях под действием теплового излучения, среднее отклонение результатов расчетов по модели относительно экспериментов составляет 4,5% при максимальном, не превышающем 20%. Новая модель применима для оценки оптимальной концентрации частиц, при которой достигается наибольшая скорость парообразования.
2. Созданы прототипы солнечных парогенерирующих установок для генерации электроэнергии и опреснения морской воды. Лабораторная экспериментальная установка позволяет проводить исследования в условиях замкнутого цикла конденсата пара и, таким образом, рассматривать процесс кипения суспензий в непрерывном режиме. Прототип солнечной парогенерирующей установки позволяет изучать кипение суспензий в условиях, схожих с теми, в которых работают существующие солнечные парогенерирующие установки. Эффективность парообразования в лабораторной установке изменялась от 45 до 60% в зависимости от типа и размера используемых частиц (графитовые микрочастицы, наночастицы оксида железа и многослойные углеродные нанотрубки), что превышает эффективность установок с поверхностным поглощением излучения на 20–50%. Эффективность парообразования в прототипе солнечной парогенерирующей установки достигала 60% и превосходила соответствующую величину для установок с поверхностным поглощением на 25%.
3. Разработана новая модель роста и движения парового пузыря в зоне кипения мелкодисперсной суспензии под действием теплового излучения. Новая модель рассматривает совместное движение парового пузыря и частицы в базовой жидкости.
4. Проведено экспериментальное исследование спектральных и интегральных характеристик поглощения солнечного и инфракрасного

излучения в суспензиях различного состава с добавлением наночастиц оксида железа и многослойных углеродных нанотрубок.

5. Разработан метод расчета поглощения теплового излучения в мелкодисперсной суспензии с учетом распределения частиц по размерам. Отклонение коэффициента поглощения суспензии, рассчитанного по предложенному методу, от экспериментальных данных в два раза меньше, чем для модели, в которой взвешенные частицы считаются одинаковыми по размеру.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Д. М. Кузьменков, А. В. Ольховский, В. С. Юнин, К. В. Куценко, Применение наночастиц для производства пара под действием солнечного излучения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2022, № 3, С. 13-23.
2. R. Bårdsgård, D. M. Kuzmenkov, P. Kosinski, B. V. Balakin, Eulerian CFD model of direct absorption solar collector with nanofluid // Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2020, Vol. 12, No. 3, pp. 033701.
3. P. G. Struchalin, H. Thon, D. M. Kuzmenkov, K. V. Kutsenko, P. Kosinski, B. V. Balakin, Solar steam generation enabled by iron oxide nanoparticles: Prototype experiments and theoretical model // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 158, pp. 119987.
4. D. M. Kuzmenkov, M. I. Delov, K. Zeynalyan, P. G. Struchalin, S. Alyaev, Y. He, K. V. Kutsenko, B. V. Balakin, Solar steam generation in fine dispersions of graphite particles // Renewable Energy, 2020, Vol. 161, pp. 265-277.
5. D. M. Kuzmenkov, P. G. Struchalin, Y. E. Litvintsova, M. I. Delov, V. I. Skrytnyy, K. V. Kutsenko, Influence of particle size distribution on the optical properties of fine-dispersed suspensions // Fluid Dynamic & Materials Processing, 2022, Vol. 18, No. 1, pp. 1-14.
6. D. M. Kuzmenkov, P. G. Struchalin, A. V. Olkhovskii, V. S. Yunin, K. V. Kutsenko, B. V. Balakin, Solar-driven desalination using nanoparticles // Energies, 2022, Vol. 14, No. 18, pp. 5743.
7. P. G. Struchalin, D. M. Kuzmenkov, V. S. Yunin, X. Wang, Y. He, B. V. Balakin, Hybrid nanofluid in a direct absorption solar collector: Magnetite vs. carbon nanotubes complete for thermal performance // Energies, 2022, Vol. 15, No. 5, pp. 1604.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Plasmonic nanobubbles as transient vapor nanobubbles generated around plasmonic nanoparticles / E. Lukianova-Hleb, Y. Hu, L. Latterini [и др.] // ACS Nano. — 2010. — Vol. 4, No. 4. — pp. 2109-2123.
- [2] Giant and explosive plasmonic bubbles by delayed nucleation / Y. Wang, M. E. Zaytsev, G. Lajoinie [и др.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2018. — Vol. 115, No. 30. — pp. 7676-7681.
- [3] Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors / R. A. Taylor, P. E. Phelan, T. P. Otanicar [и др.] // Nanoscale Research Letters. — 2011. — Vol. 6, No. 1. — pp. 225.
- [4] Optical properties of various nanofluids used in solar collector: A review / S. H. A. Ahmad, R. Saidur, I. M. Mahbubul, F. A. Al-Sulaiman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2017. — Vol. 73. — pp. 1014-1030.
- [5] Jing, D. Optical properties of nanofluids considering particle size distribution: Experimental and theoretical investigations / D. Jing, D. Song // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2017. — Vol. 78. — pp. 452-465.
- [6] Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation / G. Ni, N. Miljkovic, H. Ghasemi [и др.] // Nano Energy. — 2015. — Vol. 17. — pp. 290-301.
- [7] Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid / X. Wang, Y. He, G. Cheng [и др.] // Energy Conversion and Management. — 2016. — Vol. 130. — pp. 176-183.
- [8] Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids / M. Amjad, G. Raza, Y. Xin [и др.] // Applied Energy. — 2017. — Vol. 206. — pp. 393-400.
- [9] Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@TiO₂ core-shell nanoparticle-based receiver / H. Li, Y. He, Z. Liu [и др.] // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 121. — pp. 617-627.
- [10] Recyclable photo-thermal conversion and purification systems via Fe₃O₄@TiO₂ nanoparticles / L. Shi, Y. He, X. Wang, Y. Hu // Energy Conversion and Management. — 2018. — Vol. 171. — pp. 272-278.
- [11] Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хавмен ; [перевод с английского З. И. Фейзулиной, А. Г. Виноградовой, Л.А. Апресяна]. — Москва : Мир, 1986. — 664 с. : ил.
- [12] Dietzel, M. On vapor bubble formation around heated nanoparticles in liquids / M. Dietzel, D. Poulikakos // International journal of Heat and Mass Transfer. — 2007. — Vol. 50. — pp. 2246-2259.
- [13] Photothermal boiling in aqueous nanofluids / E. T. Ulset, P. Kosinski, Y. Zabednova [и др.] // Nano Energy. — 2018. — Vol. 50. — pp. 339-346.