

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики/Высшая школа атомной и тепловой энергетики

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

_____ А. В. Ившин

«__»_____2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ
НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НАНОПОРОШКА Al_2O_3

по направлению подготовки (специальности) 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Направленность (профиль) 13.04.01_05 Теплотехнический инжиниринг, энергоаудит и энергосервис

Выполнил
студент гр. 3241301/90501

П.Г. Бобылев

Руководитель
проф., д.т.н.

С.З.Сапожников

Санкт-Петербург

2021

РЕФЕРАТ

На 57 с., 38 рисунков, 4 таблицы, 1 приложение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ, НАНОЖИДКОСТИ, НАНОЧАСТИЦЫ Al_2O_3 , РЕЖИМЫ КИПЕНИЯ, ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА.

Тема выпускной квалификационной работы: «Интенсификация теплообмена при кипении недогретой жидкости с использованием нанопорошка Al_2O_3 ».

Данная работа посвящена исследованию повышения теплоотдачи при кипении недогретой жидкости с помощью добавления наночастиц Al_2O_3 методом градиентная теплометрия. Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Изучение работ, посвященных интенсификации теплообмена при кипении с добавлением нанопорошка Al_2O_3 .
2. Исследование интенсификации теплообмена при кипении ненасыщенной наножидкости при конкретных температурных режимах и концентрациях наночастиц.
3. Получение зависимости плотности теплового потока от температурного напора и массовой концентрации Al_2O_3 .
4. Определение концентрации частиц Al_2O_3 , при которых наблюдается максимальный рост критической плотности теплового потока.

Работа проведена на базе Научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике», где ставились все основные эксперименты. Основным методом исследования являлась градиентная теплометрия. Данные, полученные этим методом, сопоставлялись с результатами термометрии и высокоскоростной визуализации.

В результате была получена зависимость критической плотности теплового потока от температурного напора и массовой концентрации Al_2O_3 в жидкости. Определены оптимальные концентрации частиц в воде, при которых наблюдается наибольший рост критической плотности теплового потока на данных температурных режимах. Сделаны выводы о применимости наночастиц Al_2O_3 для интенсификации теплообмена при кипении недогретой жидкости.

ABSTRACT

On 57 pages, 38 figures, 4 tables, 1 application.

KEYWORDS: GRADIENT HEATMETRY, INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE DURING BOILING, NANOFLUID, Al_2O_3 NANOPARTICLES, BOILING MODES, HEAT FLUX PER UNIT AREA.

Subject final qualifying work: "Enhancement of heat transfer during boiling of subcooled liquid using nanopowder Al_2O_3 ».

This work is devoted to the study of the increase in heat transfer during boiling of a subcooled liquid using the addition of Al_2O_3 nanoparticles by the method of gradient heatmetry. Tasks that were solved during the study:

1. Study of works devoted to the intensification of heat transfer during boiling with the addition of Al_2O_3 nanopowder.
2. Investigation of heat transfer intensification during boiling of unsaturated nanofluid at specific temperature conditions and concentrations of nanoparticles.
3. Obtaining the dependence of the heat flux density on the temperature difference and the mass concentration of Al_2O_3 .
4. Determination of the concentration of Al_2O_3 particles at which the maximum increase in the critical heat flux is observed.

The work was carried out on the basis of the Scientific and Educational Center "Thermophysics in Power Engineering", where all the main experiments were carried out. The main research method was gradient heatmetry. The data obtained by this method were compared with the results of thermometry and high-speed imaging.

The result was a dependence of the critical heat flux from the temperature difference and mass Al_2O_3 concentration in the liquid. The optimum concentration of particles in water, in which there is the largest increase of the critical heat flux on determined temperature difference. Conclusions are drawn about the applicability of Al_2O_3 nanoparticles for intensifying heat transfer during boiling of a subcooled liquid.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	10
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	18
2.1. Градиентная теплотметрия	18
2.2. Изготовление и градуировка датчиков теплового потока	20
2.3. Экспериментальная модель.....	27
2.4. Экспериментальная установка.....	30
ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА.....	32
3.1. Верификация метода.....	32
3.2. Исследования теплообмена при кипении недогретой воды с	36
добавлением частиц Al_2O_3	36
3.2.1. Подготовка эксперимента	36
3.2.2. Результаты экспериментов.....	38
3.2.3. Обобщение результатов.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	54
Приложение 1 Малоинерционная трубчатая печь с терморегулятором МТП-2МР	57

ВВЕДЕНИЕ

Кипение жидкости – один из эффективных и широко применяемых способов отвода теплоты от нагретых поверхностей. Несмотря на многочисленные работы в этой области, появляются новые данные, дополняющие или подтверждающие основные результаты, полученные преимущественно еще в прошлом веке. Анализ осложняет отсутствие достоверной математической модели, которая позволила бы корректно оценить теплообмен при кипении.

Часть современных исследований связана с задачами интенсификации теплообмена при кипении. **Актуальность** данного вопроса обусловлена:

- 1) необходимостью уменьшения габаритов теплообменников, как компактных (тепловые трубки, теплообменные устройства в электронике), так и промышленных (тепловые насосы, теплообменные аппараты);
- 2) увеличением критических тепловых потоков;
- 3) необходимостью отвода тепловых потоков, имеющих экстремально высокую плотность (более 1 МВт/м^2 при охлаждении силовой электроники, микроэлектроники, термоядерных установок и т.д.);
- 4) особыми условиями кипения (отсутствие достаточного количества центров парообразования, использование специальных жидкостей и поверхностей, и т.д.) [1].

Получение достоверных значений плотности теплового потока (ПТП), используя только термометрию, проблематично, особенно с учетом отсутствия быстродействующих датчиков теплового потока. Изучение теплообмена при кипении с помощью градиентной теплотметрии позволяет получить значения местной плотности теплового потока.

Объектом исследования является нагретая шаровая модель, погружаемая в недогретую воду с добавлением частиц Al_2O_3 .

Предмет исследования – теплообмен на высокотемпературной поверхности при кипении в большом объеме недогретой наножидкости.

Цель работы – получение зависимости плотности теплового потока от температурного напора и массовой концентрации наночастиц Al_2O_3 в воде.

Основные задачи работы

1. Изучить работы, посвященные интенсификации теплообмена при кипении с добавлением нанопорошка Al_2O_3 .
2. Исследовать интенсификацию теплообмена при кипении ненасыщенной наножидкости при конкретных температурных режимах и концентрациях наночастиц.
3. Получить зависимость ПТП от температурного напора и массовой концентрации Al_2O_3 .
4. Определить концентрации частиц Al_2O_3 , при которых наблюдается максимальный рост критической ПТП.

Теоретическая и методологическая база исследования

- 1) Кутателадзе, С. С. / Основы теории теплообмена: издание 5-е, переработанное и дополненное. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- 2) Sapozhnikov S. Z. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement / Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu. // St.-Petersburg: Springer International Publishing, 2020, p 209.
- 3) Nukiyama, S. / The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure / Nukiyama, S // Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, № 7, pp. 959–970.
- 4) Дедов А. В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. Теплоэнергетика, 2019, № 12, с. 18 –54.

Практическая часть работы выполнялась на основании исследований

1. Терехов В.И. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен /С.В. Калинина, В.В. Леманов// Теплофизика и аэромеханика, 2010, том 17, № 2, с. 173 – 188.

2. Sarit K. Das Pool / boiling characteristics of nano-fluids / Nandy Putra, Wilfried Roetzel // Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2003, vol. 46, pp 851–862.

3. Saburo Toda, Michitsugu Mori, Subcooled film boiling and the behavior of vapor film on a horizontal wire and a sphere, in: Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, 1982., P. 173 – 178.

4. Sapozhnikov, S. Z. / Gradient heatmetry in study of boiling on spherical surface // Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Pavlov A. V., Bobylev P. G., Vinogradov M. D. // Journal of Physics: Conference Series, vol 1867, 2021, p 7.

5. Sapozhnikov, S. Z. / Gradient heatmetry for boiling of underheated water on spherical surface // Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Gusakov A. A., Pavlov A. V., Bobylev P. G. // Journal of Physics: Conference Series, vol 1683, 2020, p 7.

Работа выполнялась экспериментальными методами, включающими измерение температуры, плотности теплового потока и высокоскоростную визуализацию кипения. При подготовке ВКР использованы материалы таких учебных дисциплин, как «Тепломассообмен», «Метрология», «Теплофикационное оборудование», «Гидрогазодинамика», «Детали машин».

Степень научной разработанности проблемы. Экспериментальное изучение кипения на нагретых поверхностях началось с исследований, проведенных в 1934 году Sh. Nukiyaма [2]. Однако первые работы, посвященные интенсификации теплообмена при кипении наножидкости, появились сравнительно недавно, в 2003 году [3, 4].

Большинство работ по этой теме проводится при стационарных режимах, что позволяет использовать термометрию в качестве метода измерений. По полученным данным рассчитывается ПТП путем решения обратной задачи теплопроводности. Подобный метод пригоден для изучения стационарных режимов, но при переходных режимах приходится принимать ряд допущений, которые сказываются на достоверности результатов.

Научная новизна. Исследование кипения методом градиентной теплометрии позволит сопоставить кипение в чистой воде и наножидкости. По значениям местной ПТП при кипении в наножидкости с различными массовыми

концентрациями наночастиц Al_2O_3 можно определить концентрацию, при которой будет наблюдаться пик критической ПТП при данном начальном температурном напоре.

Практическая значимость. Изучение влияния нанопорошка на величину теплосъема при определенных температурных режимах и концентрациях позволит дополнить и уточнить имеющиеся данные. Исследования позволят управлять теплообменом при кипении благодаря чему удастся снизить температурный напор в начале кипения, увеличить критические тепловые потоки и интенсифицировать теплообмен.

Апробация результатов исследования

Основные результаты ВКР докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1) Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Павлов А. В., Бобылев П. Г. Градиентная теплотметрия при кипении недогретой воды на поверхности шара // III международная конференция «Современные Проблемы Теплофизики и Энергетики», 19-23 октября 2020 г., Москва.

2) Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Бобылев П. Г., Павлов А. В. Градиентная теплотметрия в исследовании кипения на шаре // XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные Вопросы Теплофизики и физической гидродинамики», 24-27 ноября 2020 г., Новосибирск.

3) Бобылев П. Г., Виноградов М. Д., Кикость Н. Е., Бикмулин А. В. Исследование интенсификации теплообмена при кипении недогретой наножидкости методом градиентной теплотметрии // Международная научная студенческая конференция 2021, 12-23 апреля 2021 г., Новосибирск.

Приняты к печати:

Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Павлов А. В., Бобылев П. Г., Виноградов М. Д. Интенсификация теплообмена при кипении в наножидкости // Двадцать третья Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством

академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках», 24-28 мая, 2021 г., Екатеринбург.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Кипение жидкости как природное явление практически не встречается в природе, за исключением экстремальных условий, например, контакт магмы с водой морей или океанов при извержении вулканов или с подземными водами и образование гейзеров. Первое задокументированное использование фазового перехода жидкость-пар для закалки оружия описал Гомер в 800 г. до н.э. [5]. Первое техническое устройство, приводимое в движение паром, сгенерированным при кипении жидкости, описано Героном Александрийским [6] в 130 г. н.э. Основоположником научных исследований принято считать немецкого врача Иоанна Готлоба Лейденфроста (1715 – 1794). В 1765 году он опубликовал «Трактат о некоторых свойствах обыкновенной воды», где описал явление, при котором капли жидкости испарялись с сильно перегретой поверхности за счет возникающей паровой прослойки [7].

Наибольший толчок в исследовании кипения дала работа японского исследователя Широ Нукиямы. В своей статье 1937 года [1] он первым построил и описал кривую кипения в большом объеме насыщенной жидкости (рис. 1.1). Исследования теплообмена проводились на проволоке, нагреваемой электрическим током. Нукияма собрал значительную экспериментальную базу для широкого диапазона температур. Критические значения ПТП определялись по току, при котором перегорала проволока. При такой постановке эксперимента переходный режим кипения не исследовался, однако достаточно подробно были изучены околоскритические и сверхкритические режимы. Нукияма теоретически описал переходный режим, соединив области пузырькового и пленочного кипения, определил значения первой и второй критической плотности теплового потока для насыщенной жидкости.

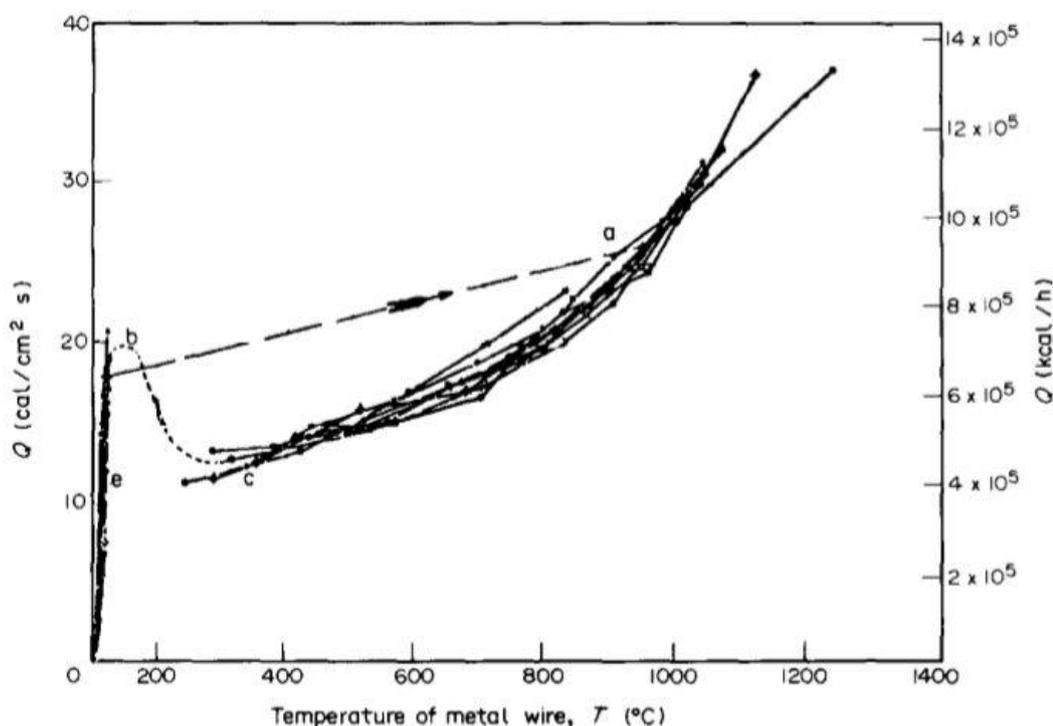


Рис.1.1. Кривая кипения [1]

Множество отечественных и зарубежных ученых, помимо Нукиямы, таких как Бромли, Лабунцов, Зенкевич, Петухов и др. изучали теплообмен при кипении воды на высокотемпературных поверхностях на протяжении 20-го века. Они внесли значительный вклад в развитие этого направления.

Механизмы интенсификации теплообмена интересовали исследователей со второй половины прошлого столетия. Первые работы, посвященные интенсификации теплообмена были связаны с модификацией поверхности теплоотдачи. Подробно результаты, полученные в 60 – 80-х годах прошлого века, описаны в сборниках [8, 9].

Впервые наночастицы как интенсификаторы теплообмена при кипении использованы в работе Sarit K. Das, Nandy Putra и Wilfried Roetzel (2003 г.) [3].

Авторы исследовали кипение насыщенной воды и жидкости с добавлением наночастиц Al_2O_3 концентрацией 1, 2 и 4% на цилиндрических нагревателях с диаметрами $d = 4; 6,5$ и 20 мм. Эксперименты проводились при атмосферном давлении. По результатам экспериментов были построены зависимости критической ПТП от температурного напора (рис. 1.2).

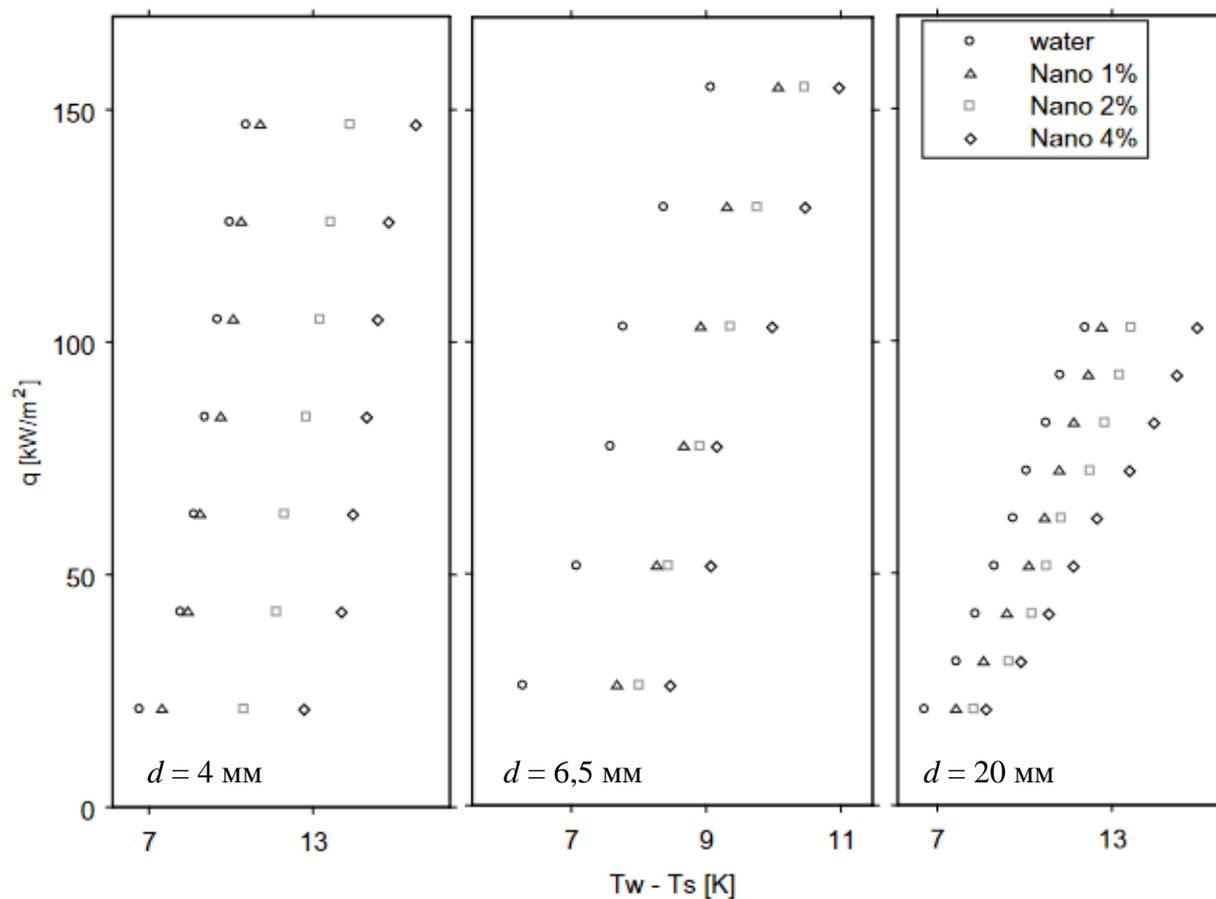


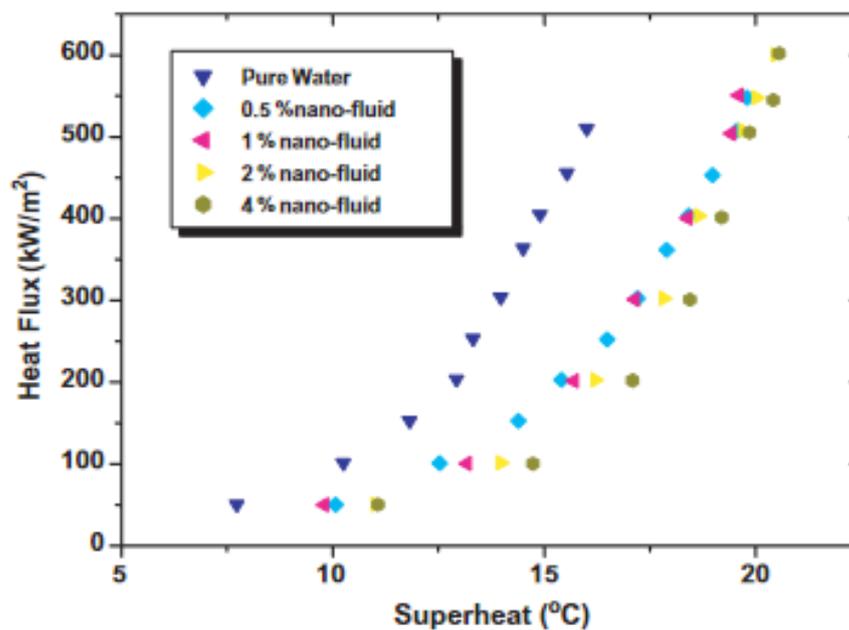
Рис.1.2. Кривые $q - \Delta T$ при кипении чистой воды и наножидкости на трубах разного диаметра [3]

Как видно из графиков (см. рис. 1.2), для передачи теплоты от нагретой поверхности к наножидкости с ПТП, соизмеримой с ПТП для чистой воды, необходим больший перегрев поверхности.

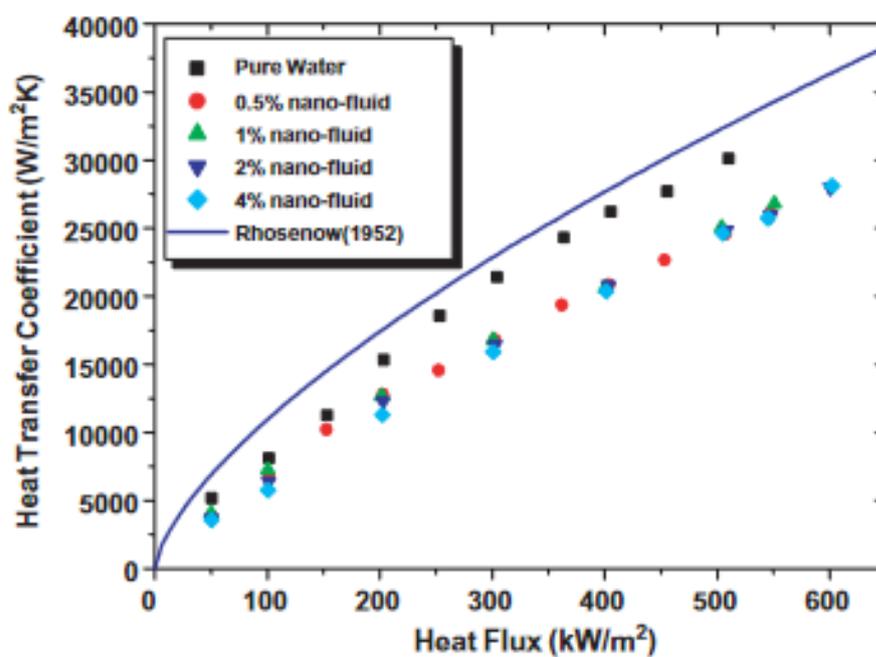
Влияние концентрации наночастиц на интенсификацию теплообмена неоднозначно. Наибольший эффект проявляется при малых концентрациях наночастиц (<1%). При больших концентрациях, зачастую наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи.

Схожие результаты получили в своей работе С. Bang и S. H. Chang [10]. Исследования проводились на четырех плоских нагревателях площадью 100 мм^2 ; рассматривались горизонтальные и вертикальные положения рабочей плоскости. В качестве рабочей жидкости использовалась вода и наножидкость с добавлением частиц Al_2O_3 с концентрацией 0,5; 1; 2 и 4%. Эксперименты проводились в насыщенной жидкости при атмосферном давлении. Получены зависимости ПТП

от перегрева поверхности (рис. 1.3, а) и зависимости коэффициента теплоотдачи от ПТП (рис. 1.3, б).



а)



б)

Рис.1.3. Сравнение данных эксперимента при кипении в чистой воде и в наножидкости с добавлением частиц Al_2O_3 различной концентрации [10]:

- а) ПТП от перегрева поверхности;
- б) коэффициента теплоотдачи от ПТП

Результаты хорошо согласуются с данными К. Das [3] (рис. 1.4).

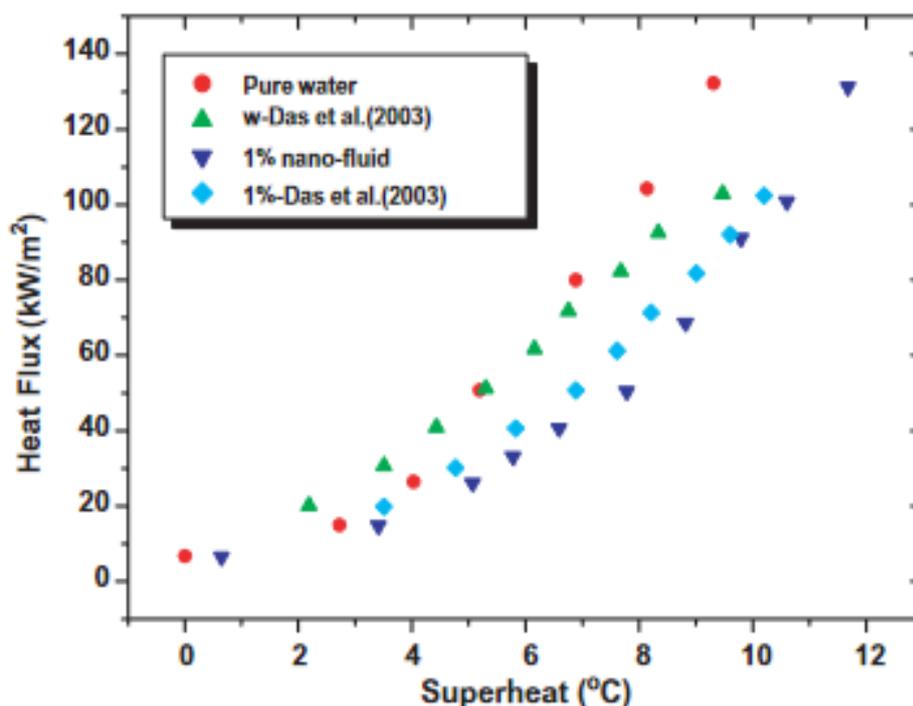


Рис.1.4. Сравнение результатов эксперимента для чистой воды и наножидкости с концентрацией Al_2O_3 1% [3;10]

Установлено ухудшение теплоотдачи при повышении концентрации наночастиц в жидкости по сравнению с чистой водой. Авторы отмечают увеличение критических ПТП на 32% и 13% для горизонтальной и вертикальной поверхностей, соответственно.

Иные результаты получили исследователи в работе [11]. Моделью служил полированный диск из нержавеющей стали диаметром 150 мм и толщиной 3 мм. Рабочая жидкость – дистиллированная вода с добавлением частиц Al_2O_3 концентрацией 0,32; 0,71; 0,95 и 1,25%. Результаты эксперимента показали значительное снижение температуры нагретой стенки при одинаковых ПТП в воде и наножидкости (рис. 1.5, а). Коэффициент теплоотдачи при добавлении наночастиц в воду относительно чистой жидкости также возрастает (рис. 1.5, б).

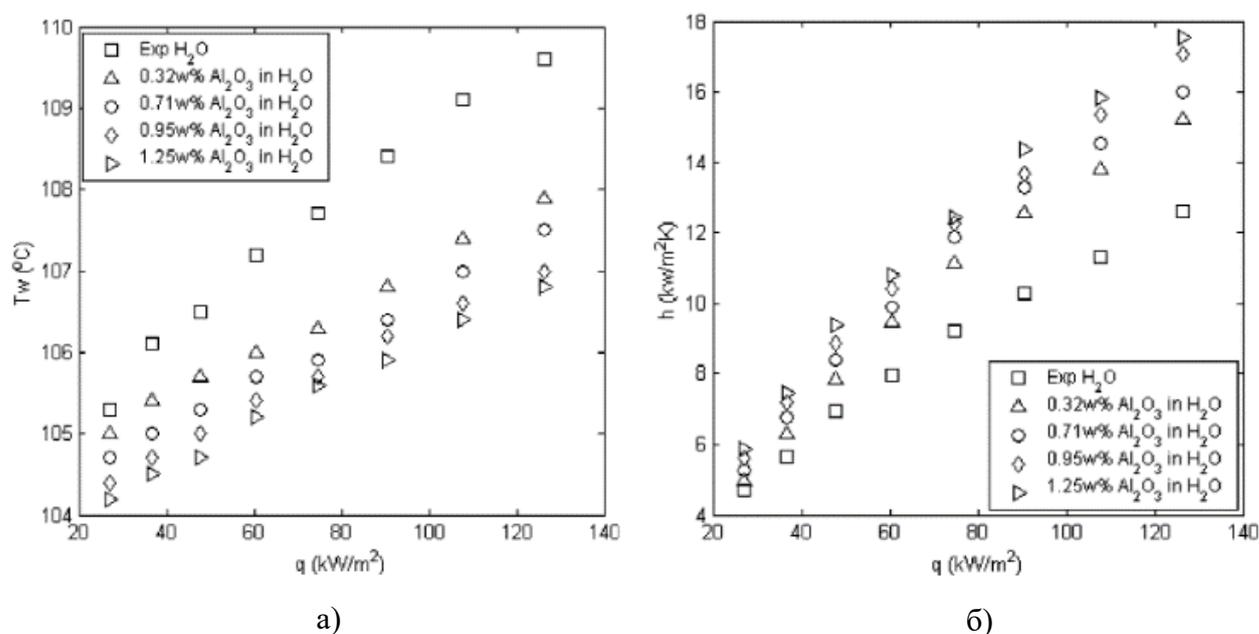


Рис.1.5. Сравнение результатов при кипении в чистой воде и в наножидкости с добавлением частиц Al_2O_3 различной концентрации [11]:

- а) ПТП от температуры стенки;
 б) ПТП от коэффициента теплоотдачи

В результате экспериментов установлено, что ПТП при кипении в наножидкости увеличилась на 20 – 40%.

В 2010 г. появилась обзорная статья [12]. В ней приведена сводная таблица (Табл.1.1), в которой собраны основные экспериментальные данные.

Таблица 1.1

Критический тепловой поток при кипении наножидкости [12]

Авторы	Наножидкость	Объемная концентрация, %	Размер частиц, нм	Отношение критических тепловых потоков
You, 2003	Al_2O_3/H_2O , горизонт. поверхность	0 – 0,13		1,24 – 3,11
Vassallo, 2004	SiO_2/H_2O горизонт. поверхность	0,5	15	1,6
	$NiCr$ проволока	0,5	50	3
		0,5 – 4	3000	1,5
Bang, 2005	Al_2O_3/H_2O , горизонт. поверхность	0,5 – 4	47	1,32 – 1,52
	Al_2O_3/H_2O , вертик. поверхность	0,5 – 4	47	1,13

Malinova, 2003	SiO ₂ /H ₂ O горизонт. поверхность, NiCr проволока			
	pH = 10,2	0,5	10	4,52
	pH = 9,22	0,5	20	2,39
	pH = 10	0,5	10	3,16
	pH = 10	0,5	20	2,3
Liu, 2007	CuO/H ₂ O Импактная струя, горизонт. поверхность	0 – 0,32	50	1,16 – 1,25

Как видно из табл. 1.1, для всех опытных данных характерно увеличение ПТП теплового потока при кипении наножидкости на 13 – 450%. Данные о коэффициенте теплоотдачи менее однозначны (рис. 1.6). На рис. 1.6 представлено сопоставление данных из работ С. Bang, S. H. Chang [10] и Wen, Ding [11] при кипении в наножидкости (Al₂O₃/H₂O) на горизонтальной поверхности.

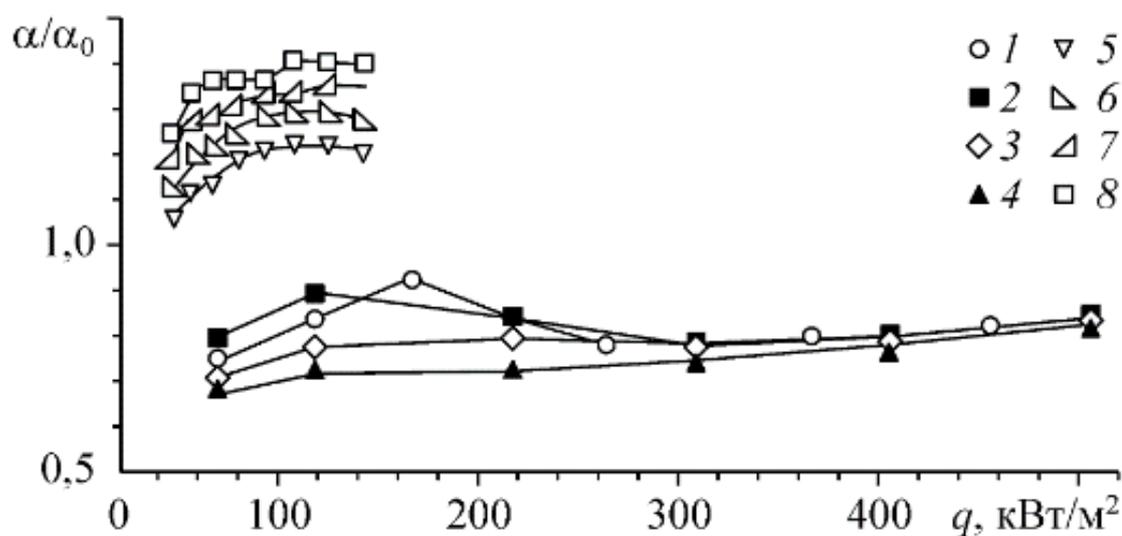


Рис.1.6. Теплообмен при кипении наножидкости (Al₂O₃/H₂O) на горизонтальной поверхности:

1- 4 – С. Bang, S. H. Chang [10], $\varphi = 0,5$ (1), 1 (2), 2 (3), 4 (4) %;
5-8 – Wen, Ding [11], $\varphi = 0,08$ (5), 0,18 (6), 0,24 (7), 0,35 (8) %

При малых концентрациях наночастиц теплосъем увеличивается на 20 – 40 %, а при более высоких концентрациях, наоборот, уменьшается на 10 – 30 %. Данные по критической ПТП хорошо коррелируют между собой. Во всех опытах

критическая ПТП возрастает, причем максимальное ее увеличение достигает 300 – 450%.

Приведенный выше обзор говорит о неоднозначности экспериментальных данных. Это связано с многофакторностью рассматриваемого вопроса, а также с нехваткой экспериментальных данных в этой области. Все эксперименты проводились в стационарных режимах, и рассматривался исключительно пузырьковый режим кипения с малыми температурными напорами. Применение градиентной теплотметрии позволит лучше изучить данный вопрос и сравнить режимы кипения в чистой воде и в наножидкости.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Градиентная теплометрия

На сегодняшний день преобладающее количество экспериментов и систем мониторинга теплотехнического оборудования осуществляется методом термометрии. Несмотря на необходимость измерять именно тепловой поток, а не температуру, первичных преобразователей для измерения ПТП значительно меньше, чем термометров различных типов.

Основными параметрами, определяющими технические возможности датчиков теплового потока (ДТП), являются:

- диапазон рабочих температур T , К;
- вольт-ваттная чувствительность S_0 , мВ/Вт;
- постоянная времени τ_{\min} , с;
- площадь поверхности F , м²;
- толщина δ , м;
- внутренне термическое сопротивление ζ , Вт/(К·м²).

Помимо этого, на технический уровень ДТП влияют стойкость к агрессивным средам, механическая прочность, возможность массового производства и т.д.

В мире существует всего несколько фирм, выпускающих ДТП типа вспомогательной стенки. Принцип работы большинства из них основан на использовании дифференциальной гипертермопары (рис. 2.1.1, а) [13]. Такие ДТП формируют сигнал, пропорциональный перепаду температур в их сечении. С уменьшением толщины δ термическое сопротивление ζ снижается, но при этом понижается и вольт-ваттная чувствительность S_0 . Данное ограничение для ДТП такого типа неустранимо [13].

Существуют, однако, и принципиально иные ДТП типа вспомогательной стенки (рис.2.1.1, б). Они выполнены из материалов с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициентов термоЭДС. Действие данных ДТП основано на поперечном эффекте Зеебека [14]. Поскольку, на основании

закона Фурье, модуль вектора ПТП пропорционален градиенту температуры, был введен термин «градиентные датчики теплового потока» (ГДТП) [13].

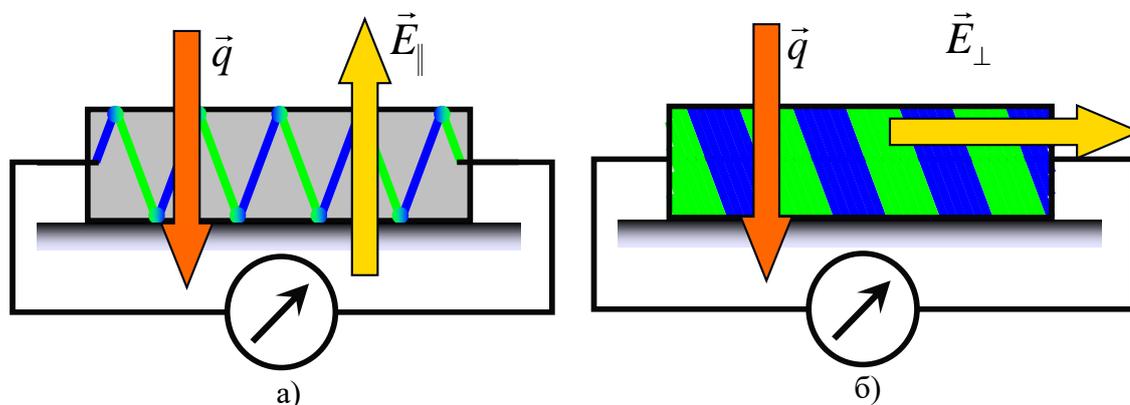


Рис. 2.1.1. Датчики теплового потока:
а) продольного и б) поперечного типа

Существует несколько различных конструкций ГДТП [13]. Так, существует ГДТП на основе монокристаллического висмута, который обладает природной анизотропией термоэлектрических свойств. Первые ГДТП были созданы на основе висмута чистоты 0,999 [15]. Датчики на его основе обладали следующими характеристиками:

- диапазон рабочих температур $T = 20 \dots 544$ К;
- вольт-ваттная чувствительность $S_0 = 5 \dots 65$ мВ/Вт;
- постоянная времени $\tau_{\min} \approx 10^{-9}$ с.

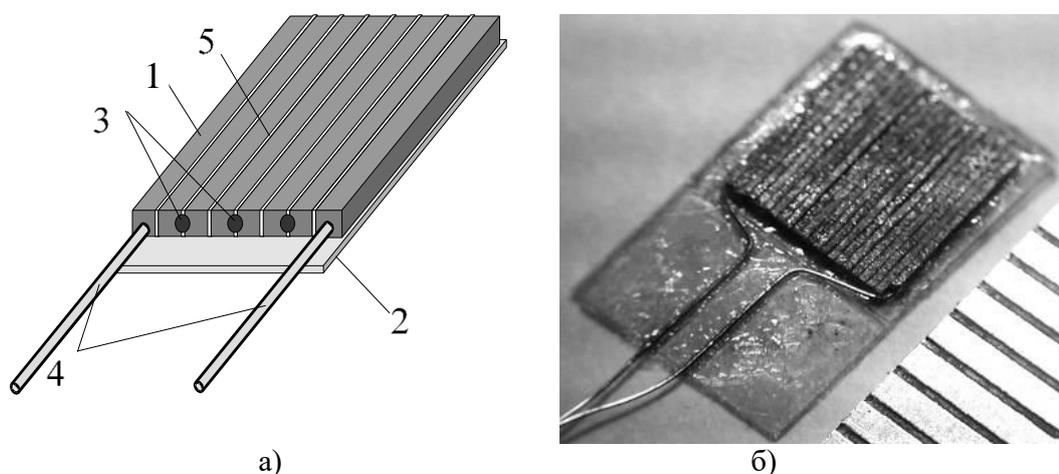


Рис. 2.1.2. Схема (а) и общий вид (б) ГДТП конструкции Н.П. Дивина (шкала в мм):
1 – АТЭ; 2 – подложка из слюды; 3 – спай из чистого висмута; 4 – токовыводы;
5 – лавсановые прокладки

Несмотря на высокую вольт-ваттную чувствительность и малую постоянную времени, ГДТП на основе висмута имеют весомый недостаток – малый температурный диапазон, обусловленный низкой температурой плавления висмута (454 К). Из-за этого применение первичных ГДТП на основе висмута ограничено, а для наших экспериментов невозможно.

2.2. Изготовление и градуировка датчиков теплового потока

В 2007 г. В Санкт-Петербургском политехническом университете созданы ГДТП на основе косослойных композитов из металлов, сплавов и полупроводников [13]. Датчики получили название гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП).

Такой тип датчиков обладает высокой. Композит, в сущности, является приближением к анизотропному монокристаллу, поэтому применима теория ГДТП [16].

Материалы для композита выбираются так, чтобы разность их термоЭДС была максимальной (Табл. 2.2.1). Это напрямую влияет на вольт-ваттную чувствительность и позволяет фиксировать даже незначительные пульсации плотности теплового потока.

Таблица 2.2.1

ТермоЭДС основных элементов

Материал	α , мкВ/К	Материал	α , мкВ/К
Sb	+43	Hg	-4,4
Fe	+15	Pt	-4,4
Mo	+7,6	Na	-6,5
Cd	+4,6	Pd	-8,9
W	+3,6	K	+13,8
Cu	+3,2	Ni	-20,8
Zn	+3,1	Bi	-68,0
Au	+2,9	Хромель	+24
Ag	+2,7	Нихром	+18
Pb	0,0	Платинородий	+2
Sn	-0,2	Алюмель	-17,3
Mg	-0,0	Константан	-38
Al	-0,4	Копель	-38

При создании композиции для ГГДТП необходимо учитывать особенности производства и последующей эксплуатации первичных преобразователей, в частности, подбирать материалы с температурой плавления, большей, чем максимальная температура при проводимых экспериментах. Исходя из этого было принято решение создать ГГДТП на основе композиции медь+никель [17].

Изготовление ГГДТП начинается с набора пакета необходимой толщины. Никелевая и медная фольга толщиной 0,05 мм нарезаются на квадраты, размерами 29×29 мм, которые обезжириваются и собираются в пакет. После сборки композиция помещается в печь стенда для диффузионной сварки, созданной в НОЦ «Теплофизика в энергетике». Стенд включает малоинерционную трубную печь МТП-2МП-50-500 и терморегулятор БУ-7-4 (производства АО «НПП «Эталон»). Параметры малоинерционной печи с терморегулятором приведены в Приложении 1. Сварка производится в среде аргона и при постоянной механической нагрузке. Эскиз и фотография диффузионной печи в сборе представлены на рис. 2.2.1 и 2.2.2.

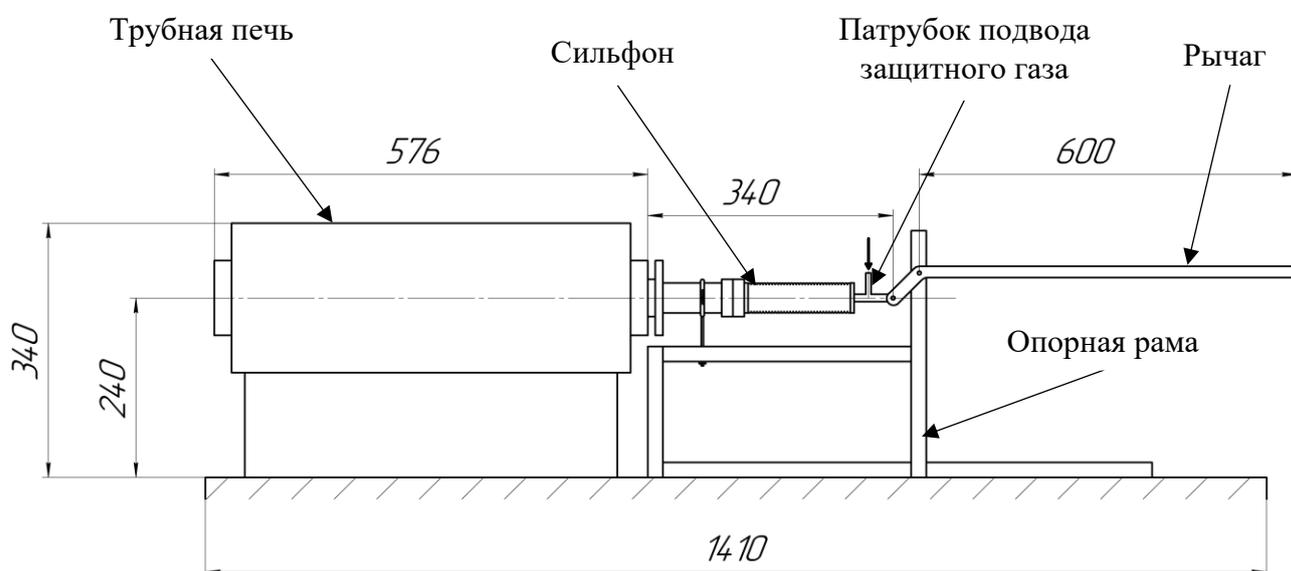


Рис. 2.2.1. Эскиз диффузионной печи с габаритными размерами

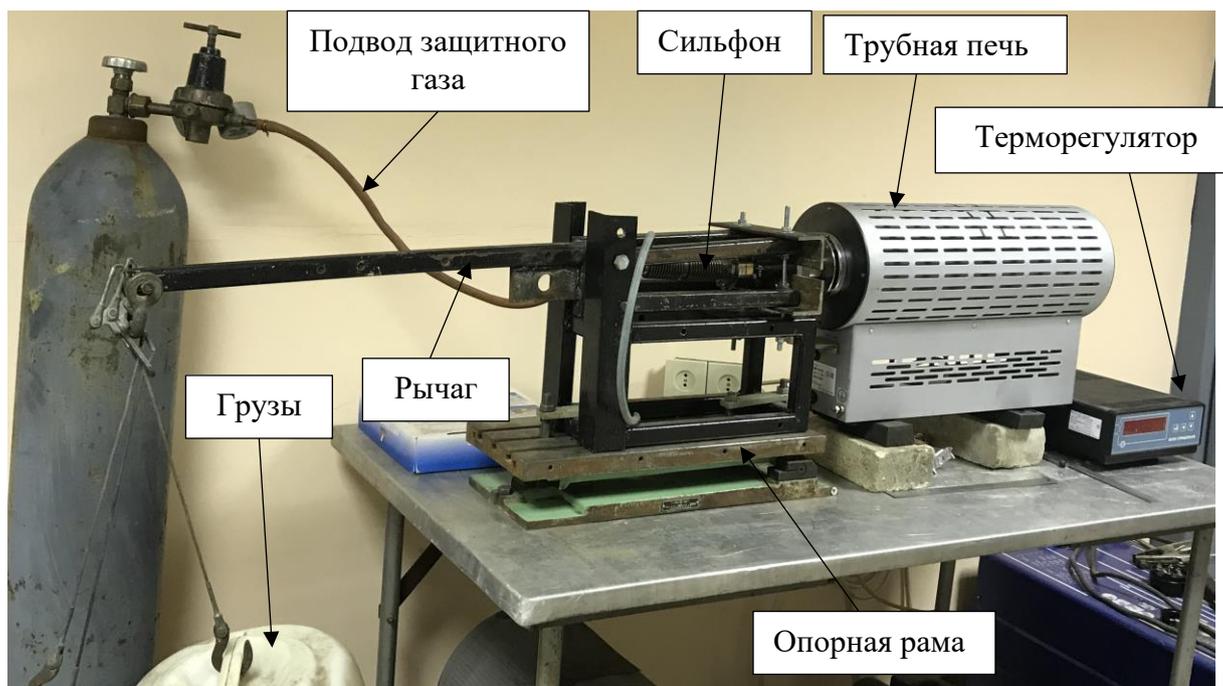


Рис. 2.2.2. Фотография установки в сборе

Чтобы получить качественную диффузию металлов при сварке, помимо размеров заготовки, необходимо определить температурные режимы, рассчитать нагрузки на образец и подобрать время выдержки заготовки. Для создания ГГДП на основе композиции медь+никель были определены следующие исходные данные:

- заготовка – медь+никель размером в плане 29×29 мм с толщиной $h = 9$ мм;
- расчетная температура $T = 900$ °С;
- расчетная нагрузка $F_p = 120 \dots 150$ кгс/см²;
- расчетное время выдержки $\tau = 20 \dots 30$ мин.

Теперь следует рассчитать реальную нагрузку на образец. Для обеспечения нагрузки на конец рычага навешиваются грузы суммарной массой 62 кг. Рычаг смещен относительно оси печи на 3 см для передачи нагрузки. Таким образом, реальная нагрузка на образец составит

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (2.2.1)$$

где F_2 – сила сжатия образца, кгс; F_1 – нагрузка на плечо приложения силы рычага, кгс; L_1 – длина рычага прилагаемой нагрузки, м; L_2 – длина рычага передачи нагрузки, м.

Реальная нагрузка

$$F_2 = 62 \cdot \frac{0,6}{0,03} = 1240 \text{ кгс.} \quad (2.2.2)$$

Полученную нагрузку следует разделить на площадь поверхности заготовки, которая составляет $S_0 = 8,41 \text{ см}^2$:

$$F_n = \frac{F_2}{S_0} = \frac{1420}{8,41} = 147,4 \text{ кгс/см}^2. \quad (2.2.3)$$

Печь разогревается до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ за 35 мин, время выдержки при сварке составляет 30 мин. Прокачка защитного газа через систему осуществлялась в течение 2 мин перед включением печи, и далее по 1-2 мин через каждые 15 мин нагрева.

Полученный в диффузионной печи монолитный брусок на электроэрозионном станке разрезают на пластины необходимой ширины (0,1...0,2 мм) под определенным углом [17]. Резка осуществляется без механического усилия и исключает разрушение композиции. Образовавшаяся после нарезки на поверхности датчика окалина стравливается в смеси азотной и уксусной кислот. К готовому датчику привариваются компенсационные провода. На рис. 2.2.3 представлена блок-схема цикла создания ГГДТП.



Рис. 2.2.3. Блок-схема полного цикла создания ГГДТП

Полученные датчики требуют градуировки. Чувствительность ГГДТП имеет экспоненциальную зависимость от температуры.

Градуировка производится в диапазоне температур, определяемом задачами эксперимента. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ООО «НПО «Эталон» и Всероссийский институт метрологии им Д.И. Менделеева (ВНИИМ) совместно создали калибровочный стенд для градуировки ГГДТП (рис. 2.2.4). Стенд позволяет выполнять градуировку в диапазоне температур от 25 до 800 °С.

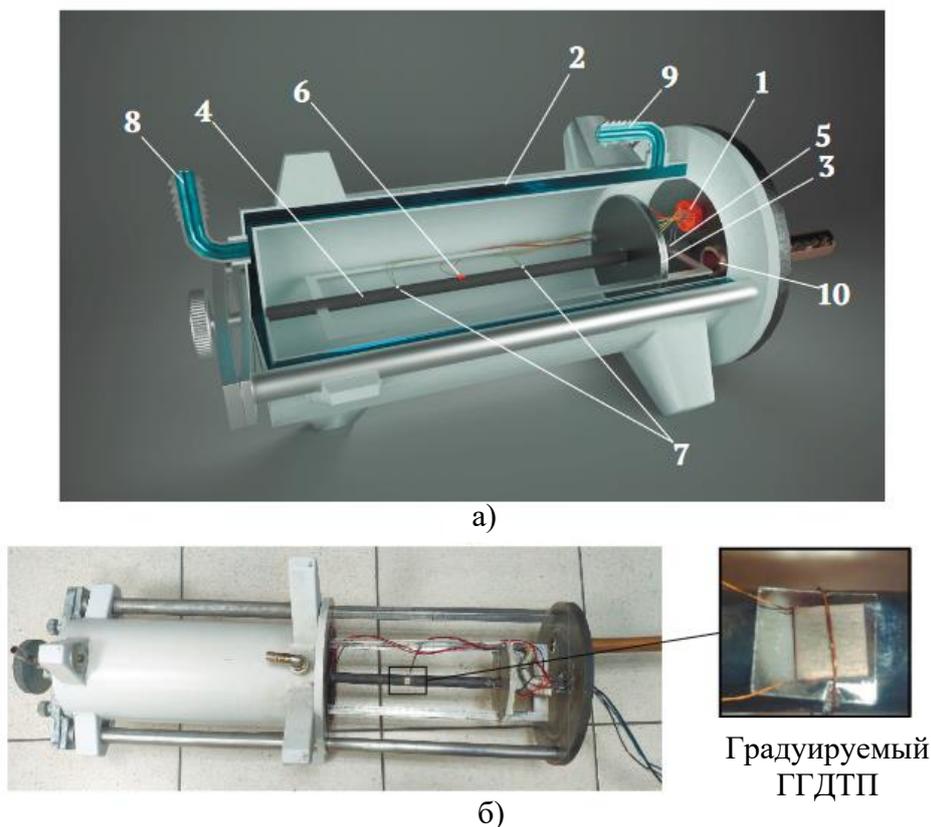


Рис. 2.2.4. Градуировочный стенд:

- а) схема стенда: 1 – разъем вывода проводов; 2 – цилиндр рубашки охлаждения; 3 – держатель трубки; 4 – трубка из нержавеющей стали; 5 – омический нагреватель; 6 – градуируемый ГГДТП; 7 – термопары; 8,9 – патрубки подвода и отвода воды соответственно; 10 – вакуумный патрубок;
- б) фотография стенда с установленным ГГДТП

Стенд представляет собой цилиндр 2 с рубашкой охлаждения. Трубка 4 из нержавеющей стали с нагревателем 5 внутри закреплена на оси цилиндра в держателях 3. Градуируемый ГГДТП и термопары 7 установлены на поверхности трубки 4 и отслеживают неравномерность нагрева трубки. Цилиндр 2 охлаждается циркулирующей водой. Подача и отвод воды осуществляется через патрубки 8 и 9. Пустота вакуумируется через патрубок 10.

Во время градуировки необходимо задать известный ПТП при известном значении температуры. Градуировка проводится по лучистому теплообмену; при достаточной глубине вакуума теплота передается за счет конвекции и излучения [18]. Конвективной составляющей можно пренебречь, так как:

$$\frac{\sum q - q_{\text{конв}}}{\sum q} < 1\%, \quad (2.2.4)$$

где $q_{\text{конв}}$ – конвективная составляющая плотности теплового потока, Вт/м²; $\sum q$ – суммарная плотность теплового потока, Вт/м².

Для нашего случая давление, при котором сохранялось данное условие, составило $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. Схема вакуумной установки представлена на рис. 2.2.5.

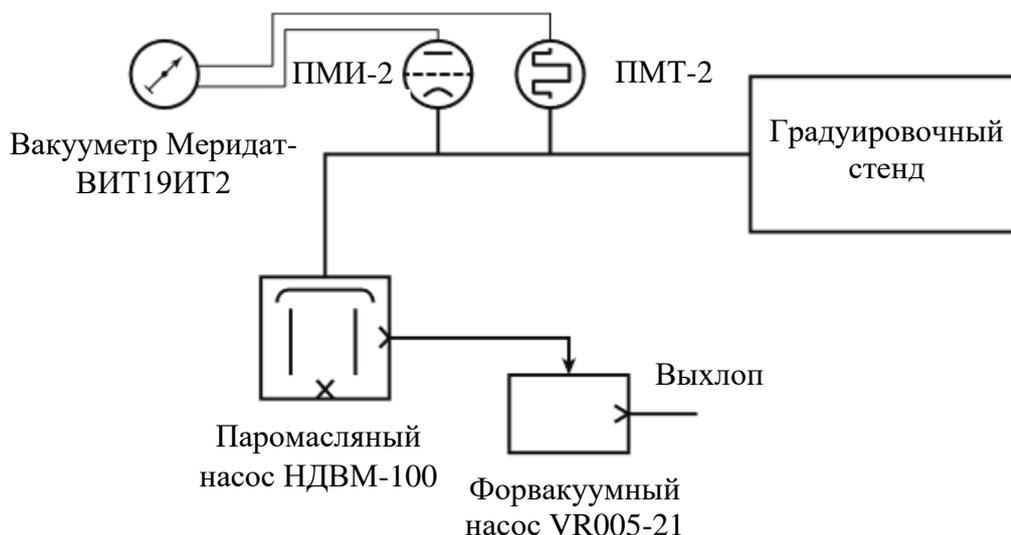


Рис. 2.2.5. Схема вакуумной установки

Нагреватель подключается к источнику тока GPR-73060D. Выделяемая на нагревателе мощность контролируется вольтметром и амперметром. Значения с градуируемого ГГДТП и термопар снимаются с помощью Fluke 289. В процессе градуировки на каждом режиме достигается стационар по температуре.

Чувствительность ГГДТП

$$S_0 = \frac{E}{q \cdot F}, \text{ мВ/Вт}, \quad (2.2.5)$$

где E – измеренный сигнал, мВ; q – плотности теплового потока, Вт/м²; F – площадь ГГДТП, м².

Для расчета ПТП необходимо знать мощность

$$P = I \cdot U, \text{ Вт}, \quad (2.2.6)$$

где U – напряжение, В, I – ток в цепи нагревателя, А.

ПТП на поверхности трубки

$$q = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot d \cdot l}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.2.7)$$

где $d = 13$ мм, $l = 220$ мм – диаметр и длина трубки, соответственно.

Таким образом, вольт-ваттная чувствительность датчиков

$$S_0 = \frac{E \cdot \pi \cdot l \cdot d}{U \cdot I \cdot F}, \text{ мВ/Вт.} \quad (2.2.8)$$

Результаты градуировки ГГДТП медь+никель представлена на рис. 2.2.6. Вольт-ваттную чувствительность для данного ГГДТП можно описать экспоненциальной функцией

$$S_0 = 4,7806 \cdot e^{(-0,011 \cdot t)}, \text{ мВ/Вт,} \quad (2.2.9)$$

где S_0 – вольт-ваттная чувствительность, мВ/Вт; t – температура ГГДТП, °С.

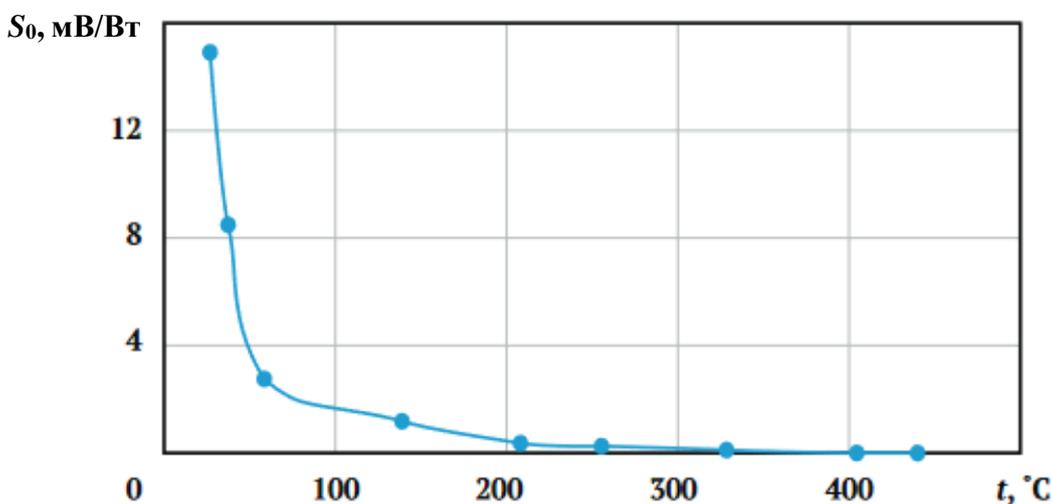


Рис.2.2.6. Зависимость чувствительности ГГДТП от температуры

Оценка неопределенности градуировки производилась путем расчета суммарной стандартной неопределенности ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Неопределённость измерения» [19].

В наших опытах относительная расширенная неопределенность градуировки составила 3,8% [17].

2.3. Экспериментальная модель

В качестве экспериментальной модели, для исключения концевых эффектов, выбрана шарообразная поверхность. Шар диаметром 34 мм изготовлен из титана BT22 на токарном станке с ЧПУ GHB-1310S CNC (рис. 2.3.1).



Рис. 2.3.1. Процесс создания экспериментальной модели

ГГДТП устанавливался заподлицо с поверхностью модели, чтобы не вносить искажений, для чего было выфрезеровано специальное углубление. Габаритные размеры углубления составили $5 \times 5 \times 0,5$ мм с двумя отверстиями диаметром $d = 1,5$ мм для вывода проводов (рис. 2.3.2). Размеры определялись размерами датчика ($3 \times 3 \times 0,3$ мм) и условиями его установки. Закрепление датчика на поверхности осуществлялось с помощью специального высокотемпературного компаунда.

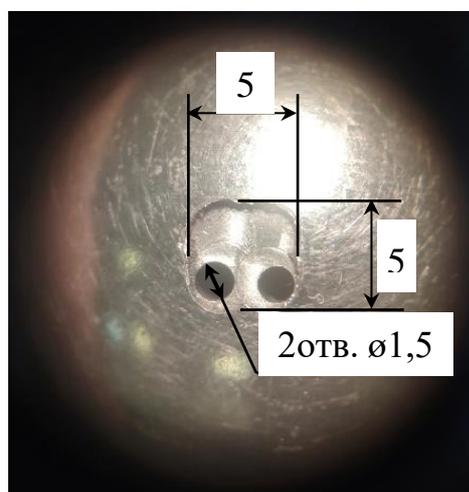


Рис. 2.3.2. Углубление для установки ГГДТП

В качестве электрического изолятора использовались полоски слюды, расположенные по краям датчика. Для плотного прилегания ГГДТП к модели под датчик наносилась термопаста (рис. 2.3.3); теплопроводность титана ВТ22 ($\lambda = 9$ Вт/м·К) и термопасты ($\lambda = 11$ Вт/м·К) сопоставимы.

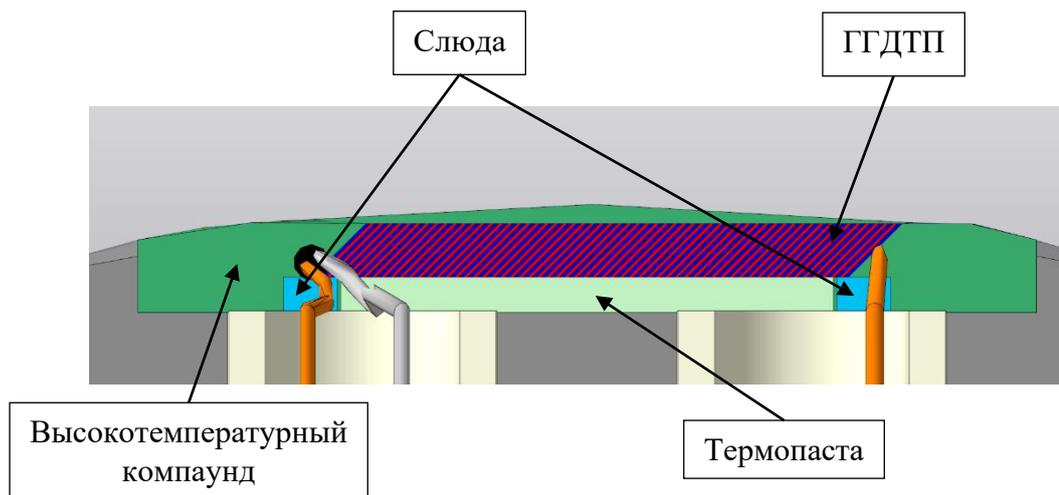


Рис. 2.3.3. Схема установки датчика

Провода к ГГДТП присоединялись методом точечной сварки. После термической обработки и шлифовки получается готовая модель с ГГДТП (рис. 2.3.4).



Рис. 2.3.4. Готовая экспериментальная модель с ГГДТП

Тепловизионная съемка зачерненной модели с установленным ГГДТП не выявила неравномерности в поле температуры разогретого шара, что говорит о корректности монтажа.

2.4. Экспериментальная установка

Чтобы определить ПТП при кипении необходимо измерить температуру поверхности модели, а также контролировать равномерность прогрева, по сечению шара. В модели были расположены две термопары: в ядре шара и на его поверхности, в непосредственном контакте с ГГДТП.

На схеме экспериментальной установки вместе с экспериментальной моделью (рис. 2.4.1) обозначены все основные элементы.

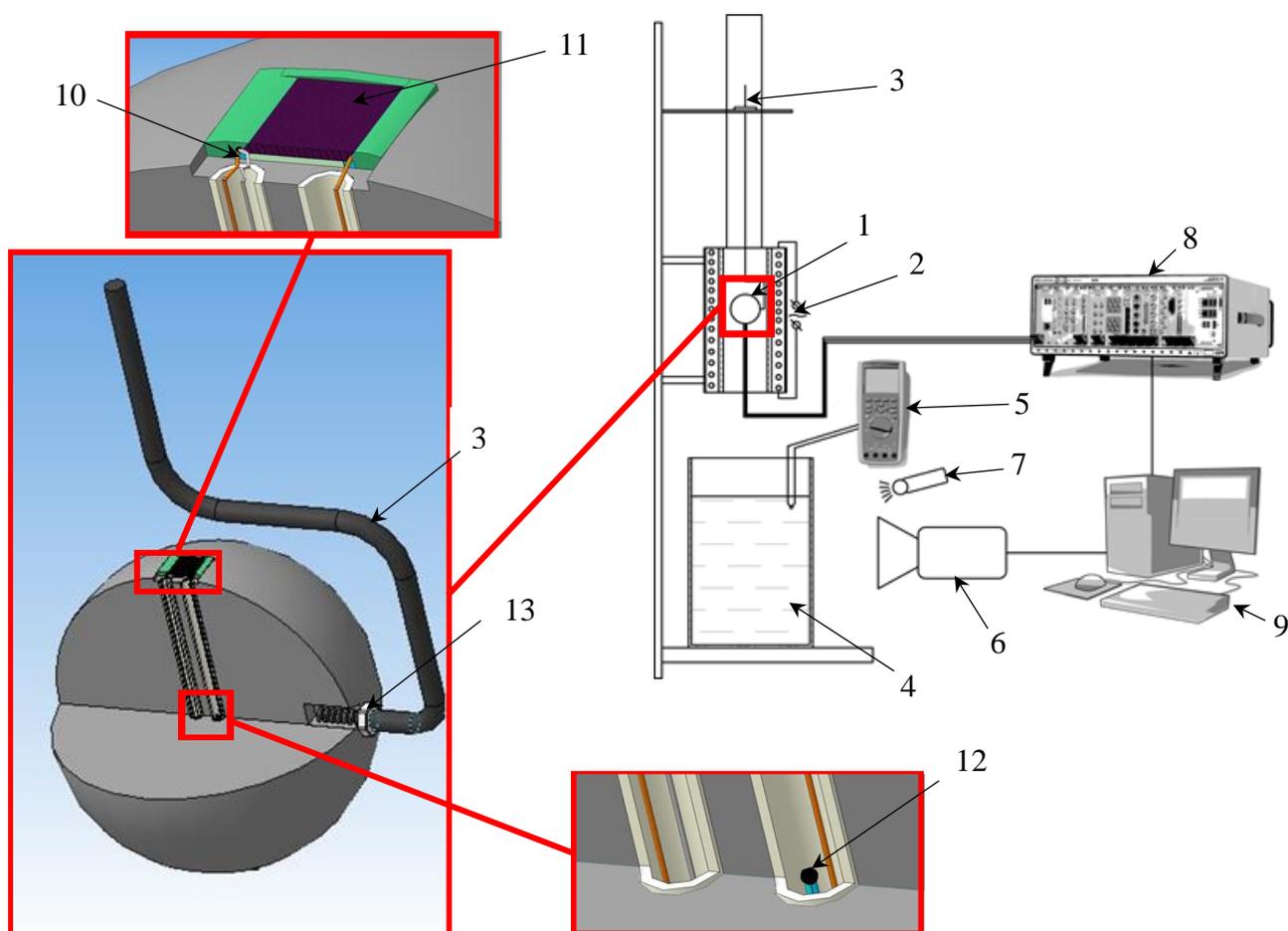


Рис. 2.4.1. Схема экспериментальной установки:

1 – исследуемый образец; 2 – печь; 3 – державка; 4 – аквариум; 5 – Fluke 289 с термопарой; 6 – высокоскоростная камера; 7 – источник света; 8 – ИВК NIPXI-1050; 9 – компьютер; 10 – термопара датчика (железо-константан); 11 – ГГДТП; 12 – термопара в ядре шара (медь константан); 13 – стопорная гайка

Исследуемый образец 1 помещается в проходную печь 2 и фиксируется в ней специальной державкой 3. Температура шара и равномерность прогрева

контролируется двумя термопарами 10 и 13. Показания с ГГДТП 11 и термопар 10 и 13 записываются на измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) 8 модели *NIPXI-1050* с частотой записи 5000 измерений/с. При достижении необходимой температуры державка 3 высвобождается и образец 1 погружается в аквариум 4. Температура воды отслеживалась с помощью мультиметра 5 *Fluke 289* с термопарой, а поддержание необходимой температуры осуществлялось омическим нагревателем. Для сопоставления данных с ГГДТП 11 и картин кипения использовалась высокоскоростная камера 6 модели *Evercam 1000-4-M* с прожектором 7. Запись кадров осуществлялась с частотой 1000 кадров/с. Запись, обработка и архивация данных осуществлялась на персональном компьютере 9.

ГЛАВА 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Верификация метода

Большинство исследований, посвященных теплообмену при кипении, связано с кипением в насыщенной жидкости. Поэтому первые эксперименты проводились в насыщенной жидкости.

Первым исследованием в научной группе СПбПУ стало изучение остывания шара с температурой 300 °С в насыщенной воде при атмосферном давлении [20]. В результате были получены временные зависимости ПТП при расположении датчика на южном (0°) и на северном (180°) полюсах шара (рис. 3.1.1).

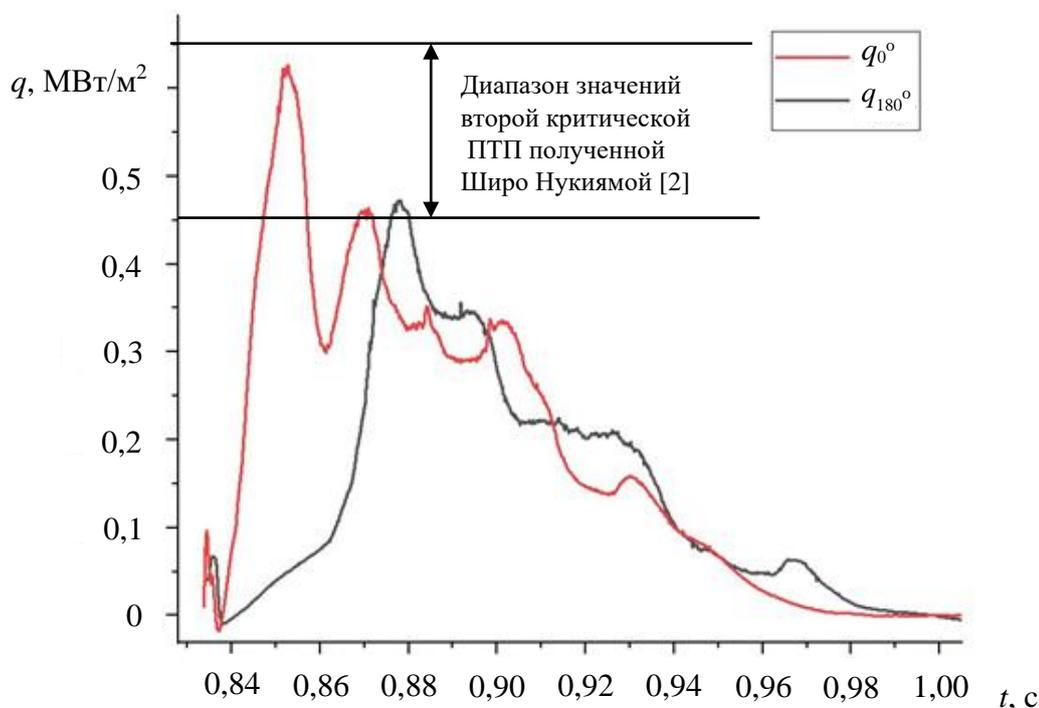


Рис. 3.1.1. Зависимость плотности теплового потока от времени [20]
($T_w = 300$ °С; $T_f = 100$ °С)

Результаты эксперимента количественно сопоставимы с экспериментами Широ Нукиямы (см. рис. 3.1.1) [2], обозначенный диапазон соответствует второй критической ПТП на кривой кипения. Это дает право говорить о применимости градиентной теплотометрии для исследования кипения в насыщенной жидкости. Быстродействие ГДТП позволило выявить разные интенсивности протекания процессов на северном и южном полюсах модели.

Следующим шагом стало использование ГГДТП при кипении в недогретой жидкости [20].

За основу была взята работа, посвященная измерению ПТП при пленочном кипении [21], в которой была предложена методика измерения толщины паровой пленки оптическим методом и последующий расчет ПТП. Данная методика пригодна только для исследования устойчивого пленочного кипения, поэтому авторы не рассматривали переходный и пузырьковый режимы кипения.

Для сопоставления результатов был выбран температурный режим с начальной температурой на поверхности модели $464\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурой воды $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.1.2).

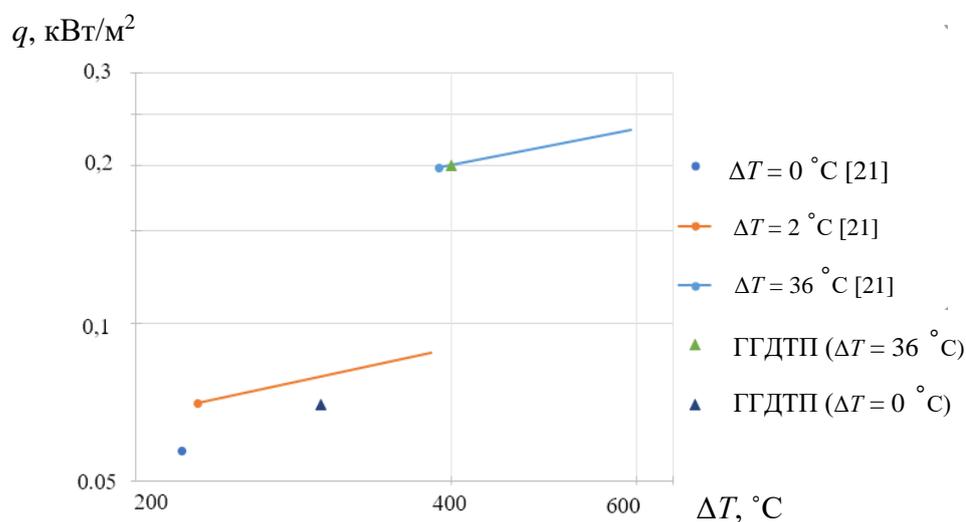


Рис. 3.1.2. Зависимость ПТП при устойчивом пленочном кипении от температурного напора

Под температурным напором подразумевается разность между температурой поверхности T_w и температурой жидкости T_f . Результаты эксперимента хорошо согласуются с данными [21]. Треугольниками на графике обозначены значения ПТП, полученные с ГГДТП при устойчивом пленочном кипении, а точки соответствуют данным, полученным зарубежными исследователями [21].

Помимо этого, была полученная зависимость ПТП от времени с наложением кадров высокоскоростной визуализации (рис. 3.1.3).

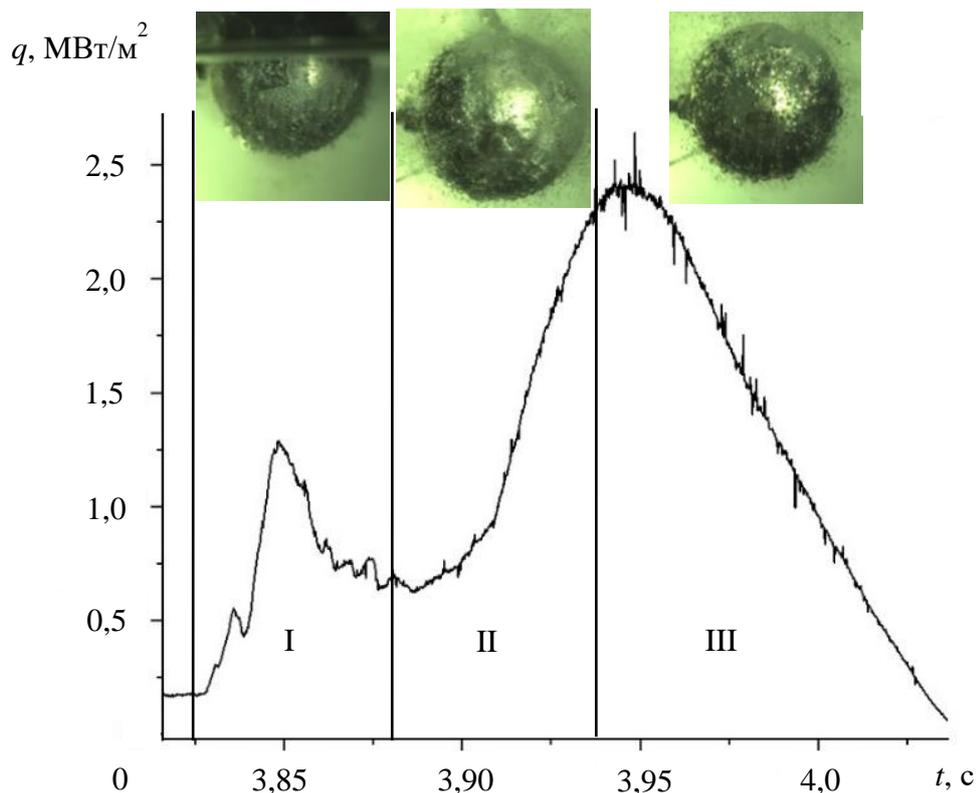


Рис. 3.1.3. Зависимость ПТП от времени
($T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_f = 64 \text{ }^\circ\text{C}$)

На графике выделены режимы кипения: пленочное (I), переходное (II) и пузырьковое (III), все видимые флуктуации на кривой связаны с колебаниями паровой пленки и отрыву пузырей на поверхности ГГДТП.

В своей монографии С.С. Кутателадзе [22] говорит о том, что пузырьковый режим кипения имеет характерный пик, превышающий второе критическое значение ПТП. Сопоставление наших данных с этими классическими результатами представлено на рис. 3.1.4. На оси абсцисс представлен безразмерный комплекс $c\Delta T/r$, где c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); ΔT – недогрев до температуры насыщения, К; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг. На графике представлены две точки полученные по результатам экспериментов с недогревом до температуры насыщения жидкости $\Delta T = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

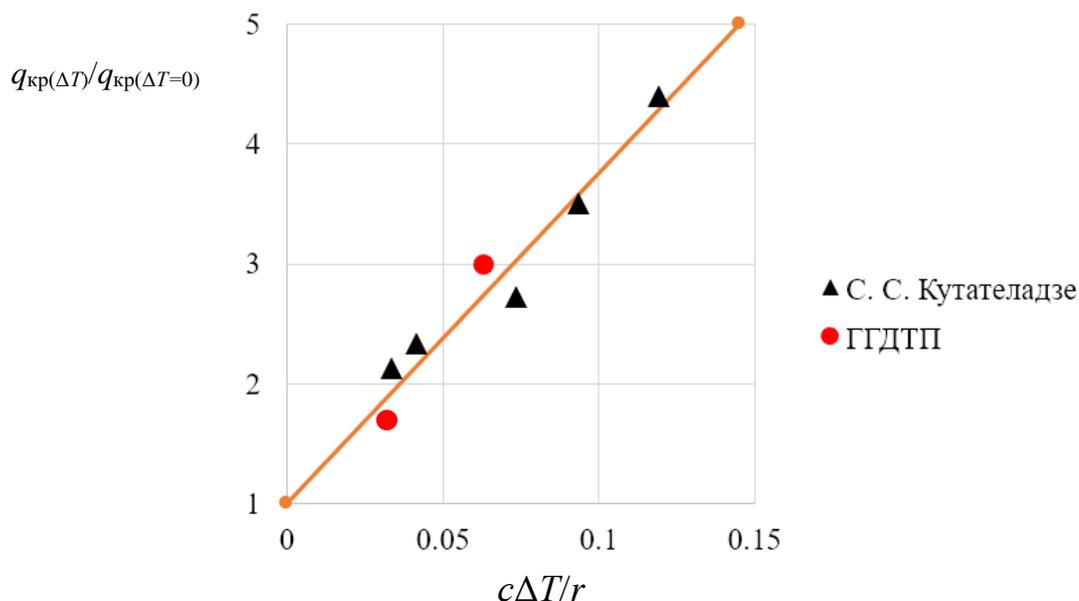


Рис. 3.1.4 Относительные изменения критической ПТП в недогретой жидкости

Все вышеизложенные результаты доказывают применимость градиентной теплотометрии в исследовании теплоотдачи при кипении в недогретой жидкости.

Следующим шагом стало определение зависимости осреднённой по площади ПТП от температурного напора [23].

Получены угловые теплограммы для четырех разных температурных напоров. На каждом режиме проводилось серия экспериментов при разных углах поворота модели φ с шагом в 15° .

В результате получена таблица осредненных значений ПТП (Табл. 3.1.1).

Таблица 3.1.1

Осредненные значения плотности теплового потока [23]

Режим	Температурный напор, $\Delta T = T_w - T_f, ^\circ\text{C}$	Средняя плотность теплового потока, $q, \text{МВт/м}^2$
$T_w = 450^\circ\text{C}, T_f = 50^\circ\text{C}$	400	9,33
$T_w = 450^\circ\text{C}, T_f = 25^\circ\text{C}$	425	3,93
$T_w = 350^\circ\text{C}, T_f = 50^\circ\text{C}$	300	0,93
$T_w = 350^\circ\text{C}, T_f = 25^\circ\text{C}$	325	0,24

В результате, было выяснено, что температурный напор ($T_w - T_f$) не определяет уровень теплосъема. Величина ПТП зависит, в основном, от

недогрева воды. Это дает основания для выбора параметров теплоносителя в различных технических приложениях.

3.2. Исследования теплообмена при кипении недогретой воды с добавлением частиц Al_2O_3

3.2.1. Подготовка эксперимента

Следующим шагом стала интенсификация теплообмена при кипении. «Все известные методы и способы интенсификации можно разделить на несколько типов:

- 1) воздействие на внутренние механизмы процесса (увеличение числа центров парообразования, управление смачиваемостью, повышение притока жидкости в зону испарения микрослоя и т.д.);
- 2) развитие теплообменной поверхности;
- 3) создание условий, подавляющих наименее эффективные процессы при кипении, связанных с необходимостью эвакуации пара от стенки (кипение сильно недогретой жидкости, чередование зон с разной смачиваемостью и т.д.)» [1].

Добавление наночастиц оксида алюминия Al_2O_3 в воду относится к первому типу. При этом вопрос о механизмах воздействия наночастиц на теплообмен при кипении до сих пор остается открытым.

Для экспериментов были выбраны два температурных режима: температура поверхности $T_w = 464$ °С, температура воды $T_f = 64$ °С и температура поверхности $T_w = 464$ °С, температура воды $T_f = 80$ °С. Массовые концентрации частиц Al_2O_3 , при которых проводились эксперименты, составили 0,32%; 0,5%; 1%; 2%; 2,6% и 4%.

Данные температурные режимы были выбраны неслучайно. При этих температурных напорах ($\Delta T_1 = 400$ °С и $\Delta T_2 = 384$ °С) четко наблюдаются три режима кипения.

Перед проведением экспериментов необходимо подготовить наножидкость с определенной величиной дисперсных частиц и их концентрацией в жидкости.

Первым этапом стал отсев порошка, при котором максимальный размер частиц не превышал 1 мкм. Использовались прецизионные сита (рис. 3.2.1) с минимальной величиной ячеек 1 мкм.



Рис. 3.2.1. Фото прецизионных сит с различной величиной ячеек

Просеянные частицы размешивались в воде. При помощи измерительного микроскопа получены фотографии частиц (рис.3.2.2).

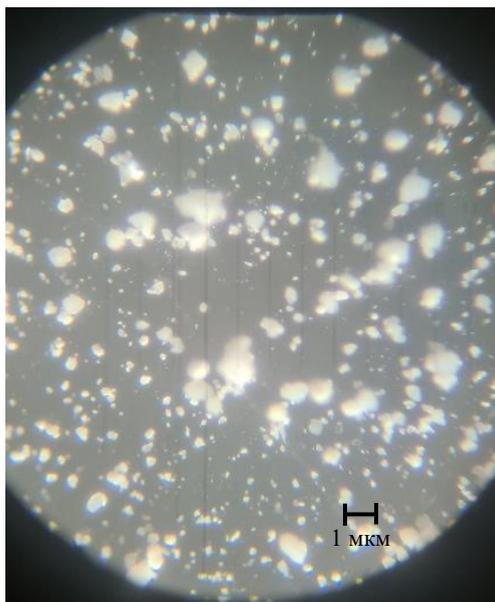


Рис. 3.2.2. Фотография размеров частиц Al_2O_3 после просеивания

Следующим этапом стало определение необходимого количества наночастиц в воде для достижения нужной концентрации. Так как вода с подмешенными в нее частицами составляют гетерогенную систему (Al_2O_3 нерастворим в воде), то считать объемную концентрацию некорректно и необходимо рассчитать массовую концентрацию частиц в воде

$$\omega = \frac{m_{ч-ц}}{m_{сум}} \cdot 100\% , \quad (3.2.1)$$

где ω – массовая концентрация частиц, %; $m_{ч-ц}$ – масса частиц, кг; $m_{сум}$ – суммарная масса воды и частиц, кг.

Масса воды при температуре 64 °С составила 5,745 кг. В таблице 3.2.1 приведена масса частиц Al_2O_3 в зависимости от массовой концентрации.

Таблица 3.2.1

Масса частиц Al_2O_3 в зависимости от концентрации

ω , %	$m_{ч-ц}$, кг
0,32	0,018
0,5	0,029
1	0,058
2	0,12
2,6	0,15
4	0,24

3.2.2. Результаты экспериментов

Чтобы сделать выводы о влиянии частиц Al_2O_3 в воде на теплоотдачу при кипении, все полученные результаты сопоставлялись с кривой кипения в чистой воде при тех же температурных режимах (см. рис 3.1.3).

На рис. 3.2.3 представлена временная зависимость местной ПТП при кипении в чистой воде и в воде с добавлением наночастиц Al_2O_3 концентрацией 0,32%.

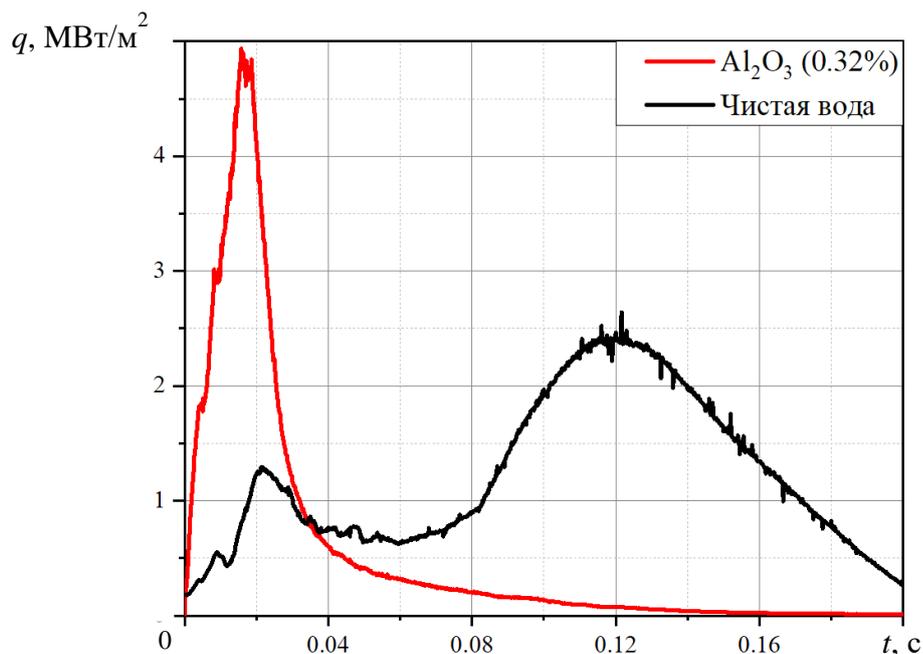


Рис. 3.2.3. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (0,32%)

При данной массовой концентрации пленочного и переходного режимов не наблюдается. Благодаря этому значительно вырос пик критической ПТП при сокращении времени остывания модели. При этом на обеих кривых наблюдаются колебания ПТП вблизи максимума, что связано с образованием и срывом пузырей с поверхности ГГДТП. Значения критической ПТП в наножидкости возросли в 2 раза относительно значений, полученных в чистой воде.

На кривой ПТП при кипении с массовой концентрации частиц 0,5% (рис. 3.2.4) также не наблюдается ни пленочного, ни переходного режимов. При этом время полного остывания модели увеличилось более, чем в 2 раза, относительно предыдущего графика (см. рис. 3.2.3). Значения критической ПТП так же возросло как относительно чистой воды, так и относительно концентрации частиц, равной 0,32%.

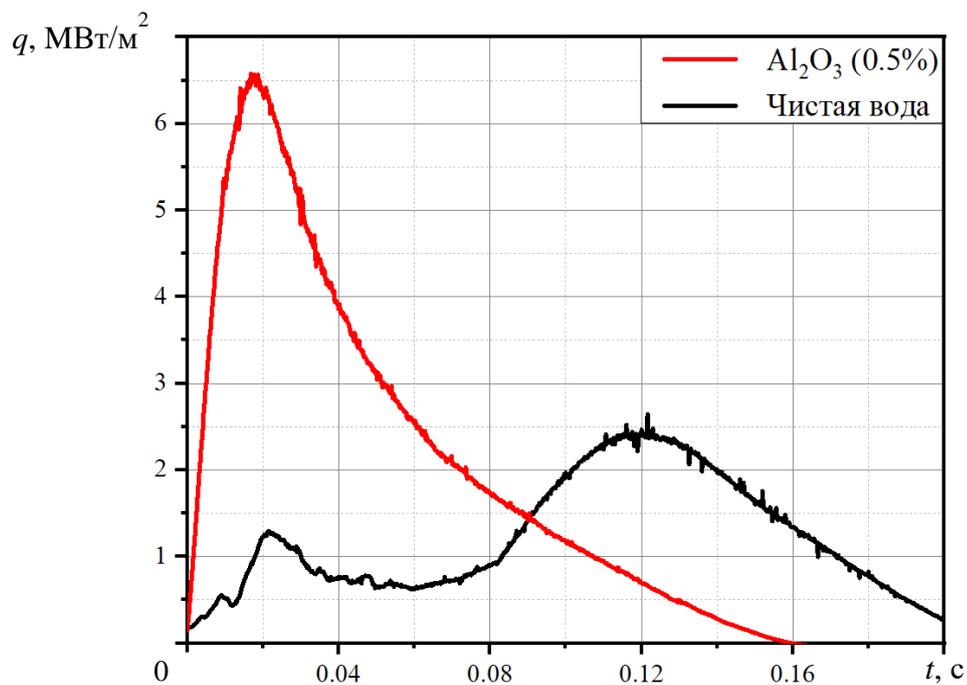


Рис. 3.2.4. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (0,5%)

Наибольший пик критической ПТП наблюдается при массовой концентрации наночастиц Al_2O_3 , равной 1% (рис. 3.2.5).

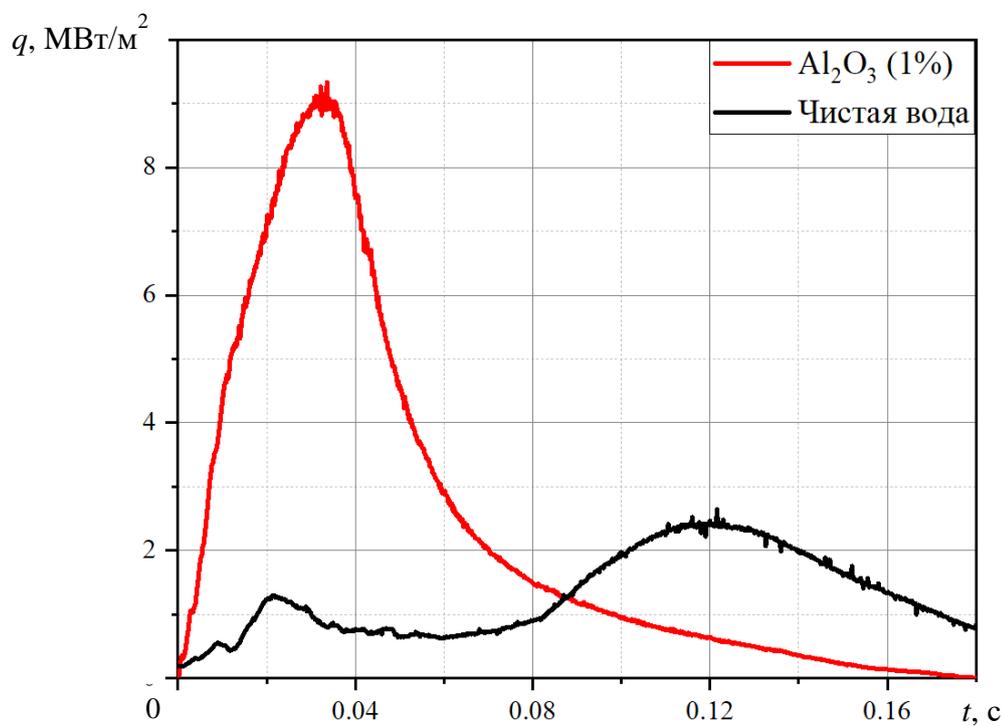


Рис. 3.2.5. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (1%)

Картина остывания модели в наножидкости с концентрацией частиц, равной 1%, совпадает с аналогичным процессом концентрации частиц 0,5% (см. рис. 3.2.4). Значения критической ПТП при данной концентрации выросли на 360% относительно чистой воды, что хорошо согласуется с результатами других авторов [1].

Как следует из статьи [3], с дальнейшим увеличением концентрации должно произойти снижение критической ПТП. При этом возможно сохранение или снижение среднего значения ПТП.

На рис. 3.2.6 представлена временная зависимость ПТП при кипении в наножидкости с концентрацией частиц 2%. Наблюдается снижение критической ПТП при сохранении времени полного остывания модели.

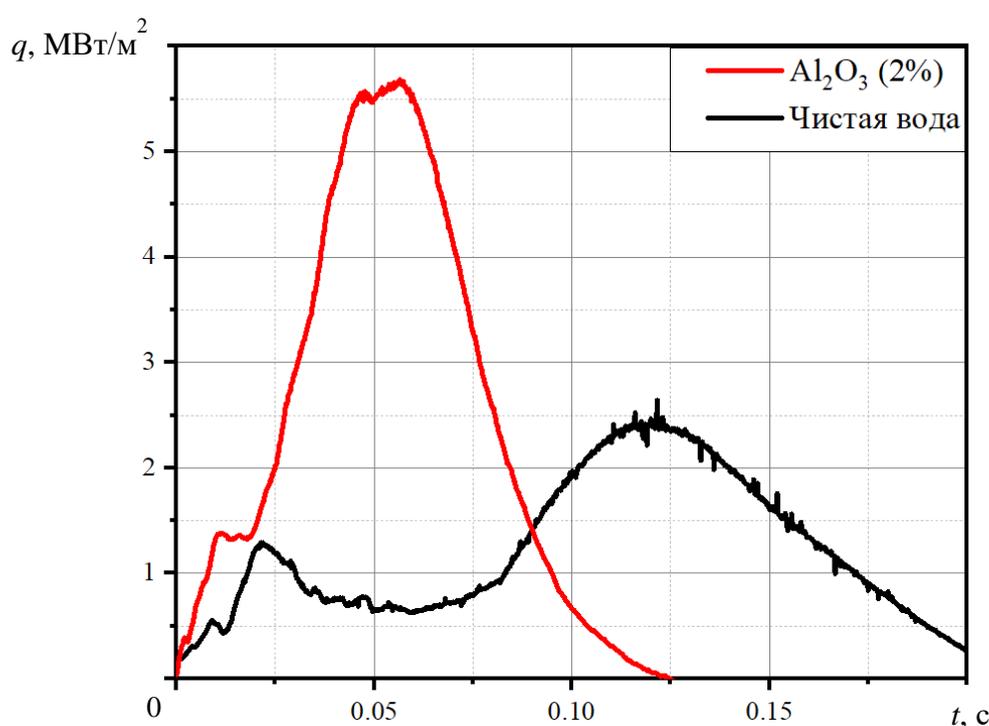


Рис. 3.2.6. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (2%)

Процесс кипения при данной концентрации наночастиц Al_2O_3 интересен по двум причинам.

Во-первых, при кипении наножидкости с концентрацией частиц 2% наблюдается устойчивое пленочное кипение, характеризуемое пологой кривой

на графике. Уровень ПТП при устойчивом пленочном кипении для данной концентрации соизмерим с ПТП при пленочном кипении в чистой воде.

Во-вторых, процесс устойчивого пузырькового кипения здесь длится гораздо дольше, чем при остальных концентрациях – несмотря на снижение значения критической ПТП относительно жидкости с концентрацией частиц 1% (см. рис. 3.2.5).

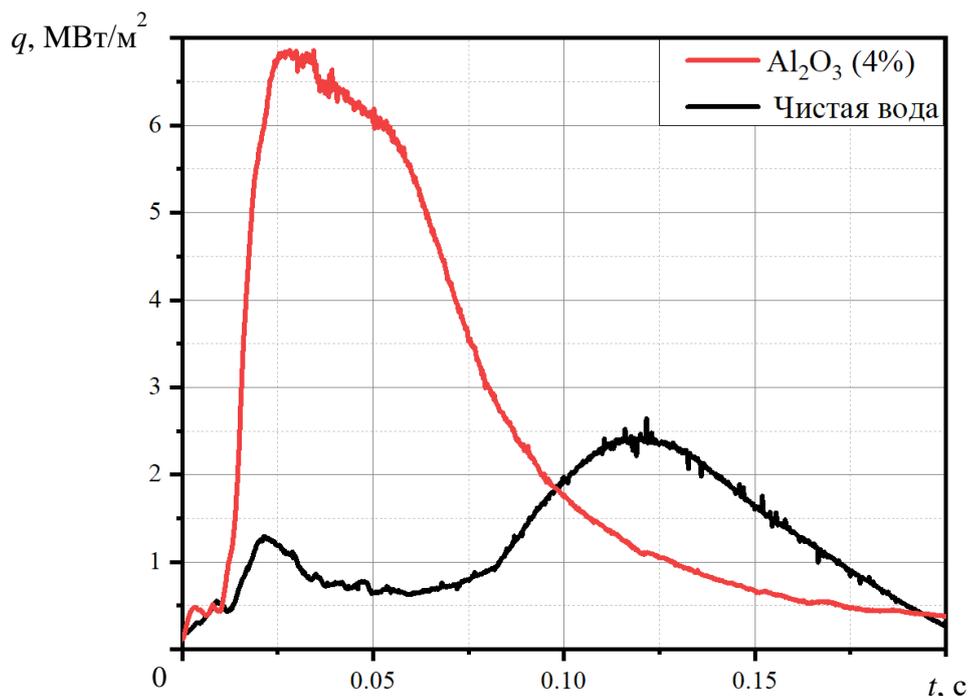


Рис. 3.2.7. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (4%)

На графике видно, что от концентрации 4% (рис. 3.2.7), наблюдается незначительное снижение значения критической ПТП относительно концентрации 1% (см. рис. 3.2.5). Однако, также как и при предыдущей концентрации, наблюдается устойчивое пленочное кипение и отсутствует переходный режим. При этом ПТП при пленочном кипении для данной концентрации намного ниже, чем для предыдущей (см. рис. 3.2.6), но уровень ПТП при пленочном кипении численно совпадает с величиной ПТП для чистой воды. Устойчивое пузырьковое кипение с высокими значениями ПТП длится гораздо дольше, чем при всех предыдущих концентрациях. Время остывания модели для концентраций 2% и 4% незначительно выросло относительно остальных концентраций за счет образования паровой пленки.

Для того, чтобы получить полную картину влияния концентрации наночастиц Al_2O_3 в воде на значения критической ПТП, был построен график зависимости относительных критических ПТП от концентрации (рис.3.2.8).

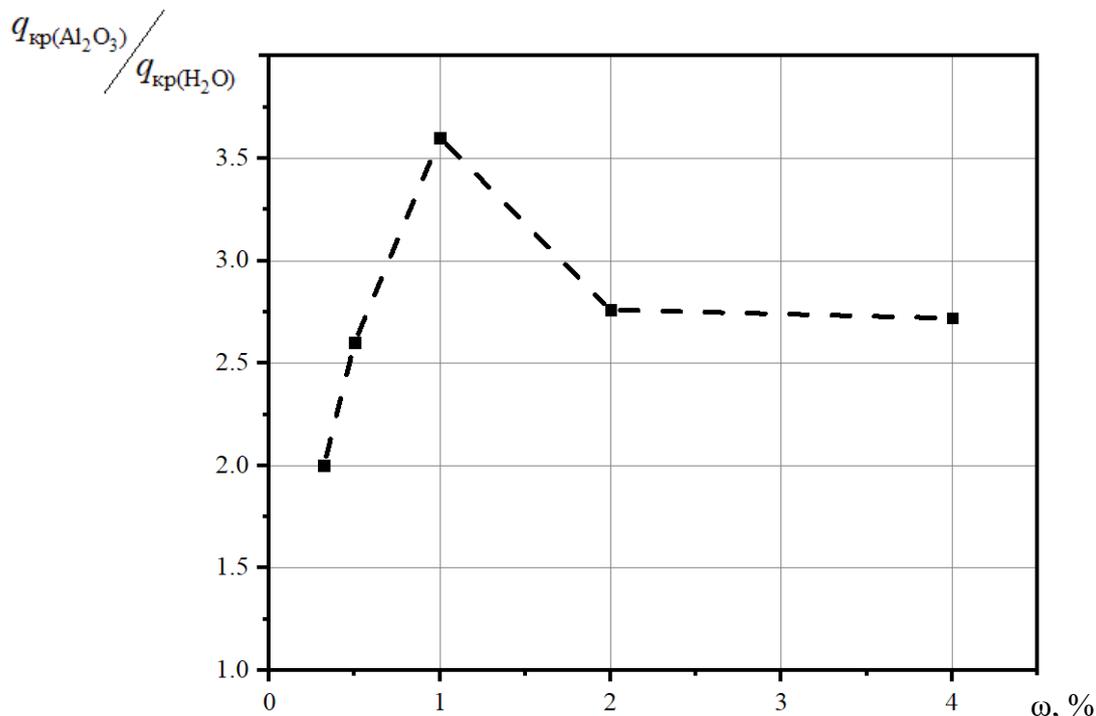


Рис. 3.2.8. График зависимости относительной критической ПТП от концентрации частиц Al_2O_3 ($T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_f = 64 \text{ }^\circ\text{C}$)

Как видно из графика, добавление в недогретую жидкость частиц Al_2O_3 интенсифицирует теплообмен во всем диапазоне концентраций (0,32 – 4%). При этом наибольший эффект достигается при 1%. Критическая ПТП для этой концентрации составляет 9 МВт/м^2 , что в 3,6 раза больше, чем в чистой воде.

На температурном режиме $T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаются ярко выраженные пленочный, переходный и пузырьковый режимы. График временной зависимости ПТП для двух температурных режимов $T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 64 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ в чистой воде приведен в рис. 3.2.9.

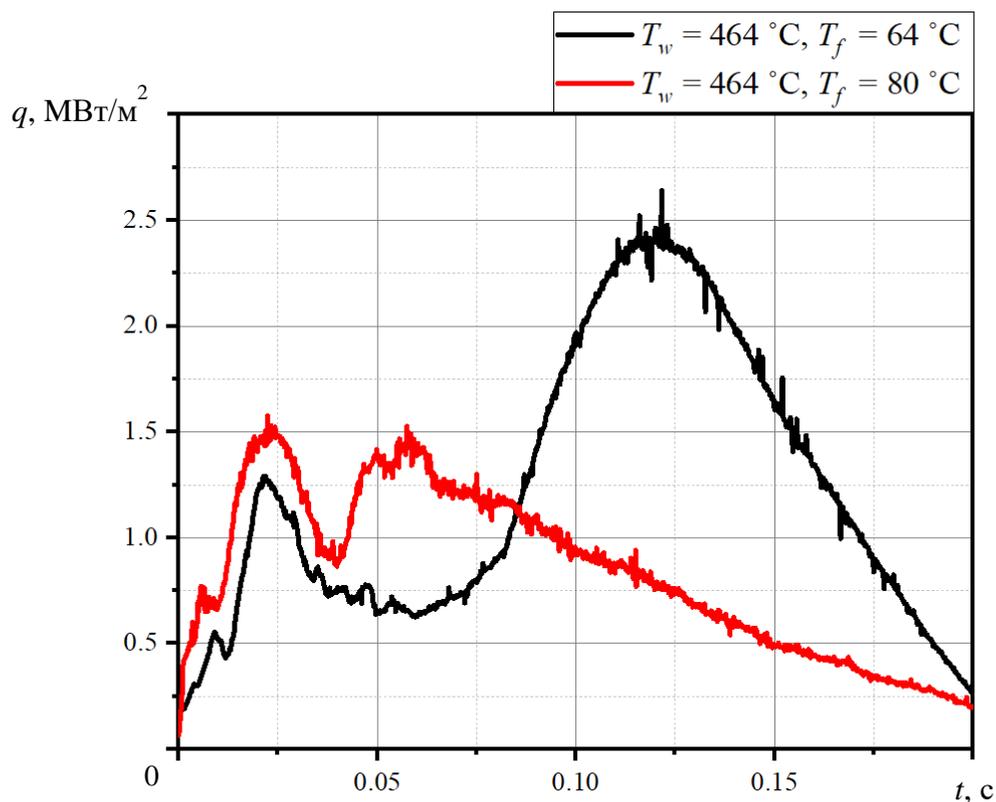


Рис. 3.2.9. Зависимость мгновенной ПТП для чистой воды от времени

На графике видно качественное совпадение пленочного режима кипения для обоих температурных режимов. Интенсивность пузырькового режима кипения при меньшем недогреве воды намного ниже. Следует отметить, что время остывания модели при данных температурных режимах совпадает.

При кипении в чистой воде с недогревом в 20 °C получаем более выраженные пленочный и переходный режимы со снижением интенсивности пузырькового режима кипения. Поэтому данный режим отлично подходит для проверки влияния частиц Al_2O_3 на интенсификацию теплообмена при кипении.

Первой рассмотренной концентрацией стала массовая концентрация частиц Al_2O_3 , равная 1% (рис. 3.2.10).

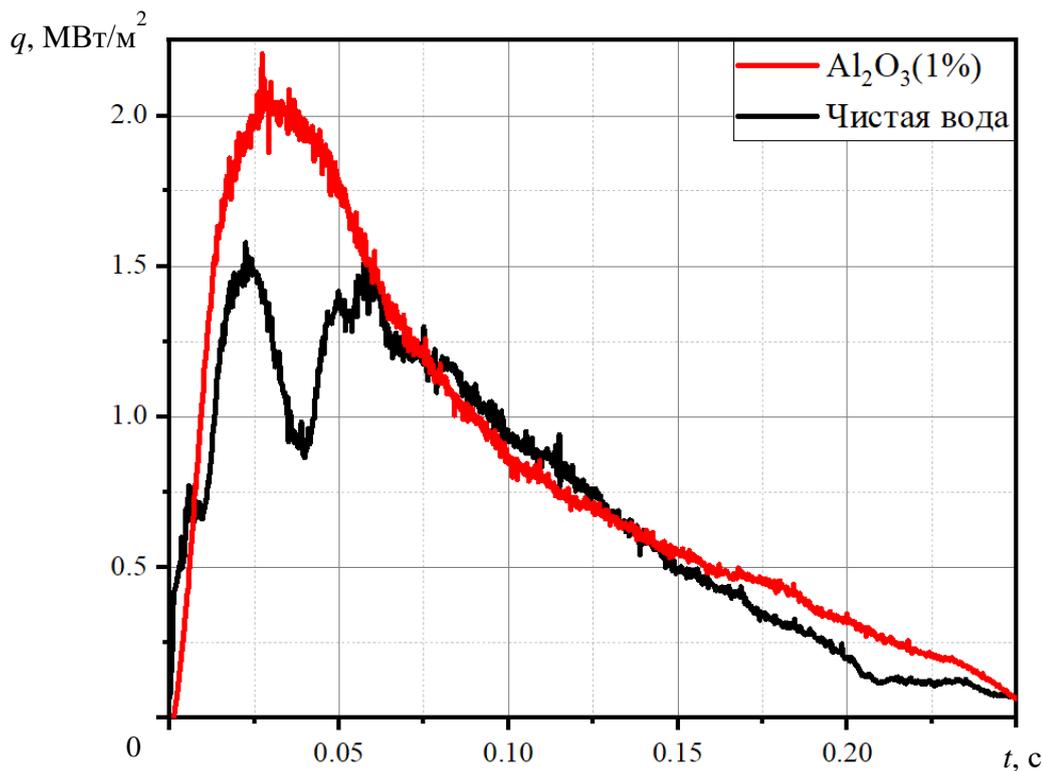


Рис. 3.2.10. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (1%)

Видно, что при добавлении наночастиц с массовой концентрацией 1% устойчивый пленочный и переходный режимы кипения исчезают, а интенсивности пузырькового режима кипения повышается. Подобную картину мы наблюдали при данной концентрации для предыдущего температурного режима. Время остывания модели при данном недогреве для чистой воды и для взвеси с массовой концентрацией частиц Al_2O_3 совпадает.

Рассмотрим временную зависимость ПТП при кипении в воде с массовой концентрацией наночастиц Al_2O_3 2% (рис. 3.2.11). Здесь наблюдается устойчивое пленочное кипение с уровнем ПТП, количественно совпадающим с уровнем, достигающимся при кипении в чистой воде. Если на предыдущем температурном режиме оптимальное значение критической ПТП при пузырьковом кипении пришлось на 1% массовой концентрации наночастиц с последующим снижением (см. рис. 3.2.5), то при данном температурном режиме оптимальное значение критической ПТП сдвинулось к большим концентрациям взвеси.

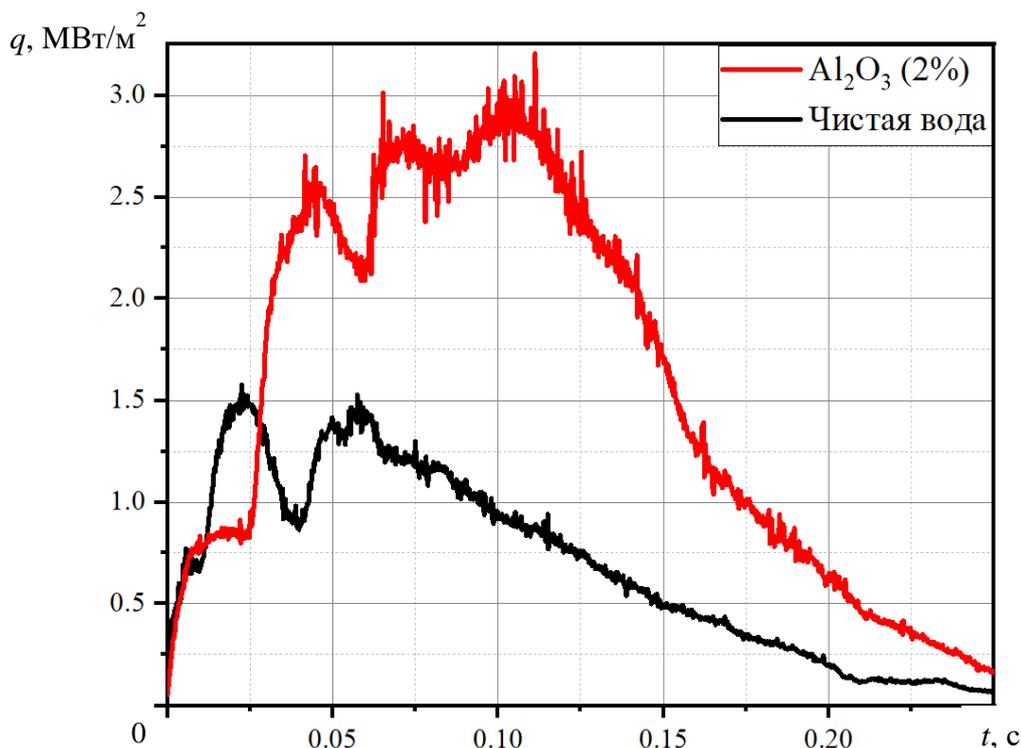


Рис. 3.2.11. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (2%)

Несмотря на то, что общий уровень значения критического ПТП при данной концентрации наночастиц возрос почти в 2 раза, время остывания модели не изменилась, а время существования устойчивого пленочного режима увеличилось больше, чем в 2 раза относительно чистой воды. Первый пик ПТП при кипении в наножидкости, равный $2,5 \text{ МВт/м}^2$, соответствует переходному режиму. Время переходного режима кипения для чистой воды и для наножидкости совпадает. Устойчивое пузырьковое кипение в наножидкости длится дольше при сохранении высоких значений ПТП.

Пик критической ПТП при данном температурном режиме приходится на массовую концентрацию частиц Al_2O_3 , равную 2,6%.

Для данной концентрации график зависимости ПТП от времени приведен на рис. 3.2.12.

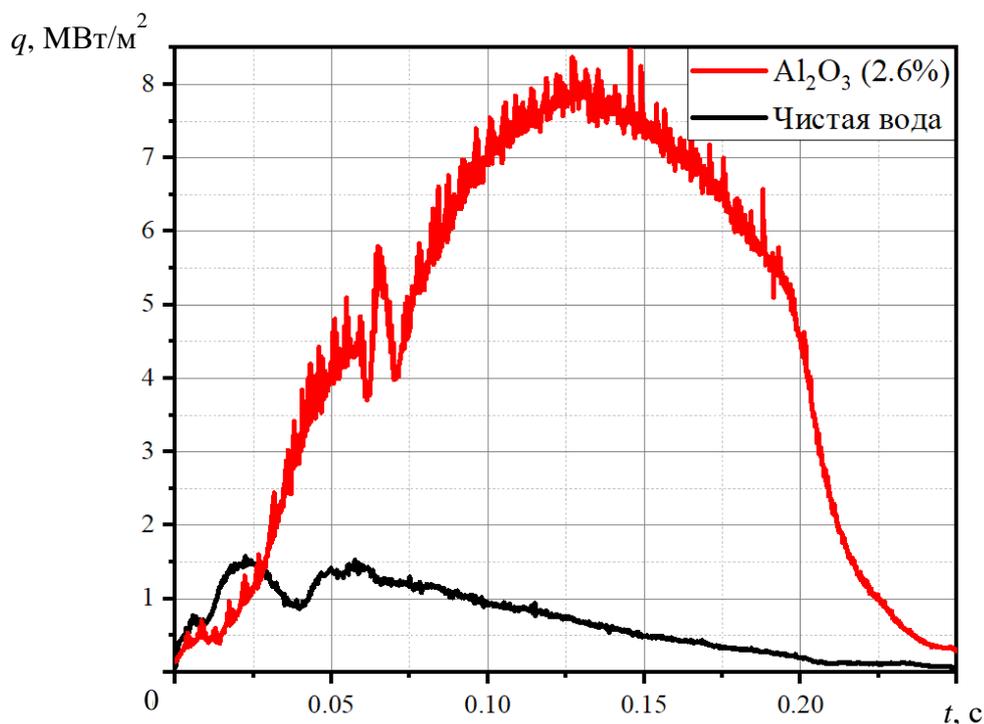


Рис. 3.2.12. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (2,6%)

При кипении в наножидкости наблюдаются все режимы кипения; устойчивое пленочное кипение количественно и качественно совпадает с кипением в чистой воде. Время существования паровой пленки в обоих случаях соизмеримо. Значения ПТП для переходного режима в воде с добавлением частиц Al_2O_3 значительно выше, чем в чистой воде. Критическая ПТП в наножидкости возрасла на 513% относительно чистой воды. Несмотря на высокую интенсивность процесса, время полного остывания модели для чистой воды и наножидкости совпадают.

Последняя рассмотренная массовая концентрация – 4% (рис. 3.2.13). На графике, приведенном ниже, видно снижение критической ПТП при кипении в наножидкости относительно предыдущих концентраций. Из этого следует, что изучение более высоких концентрация нецелесообразно.

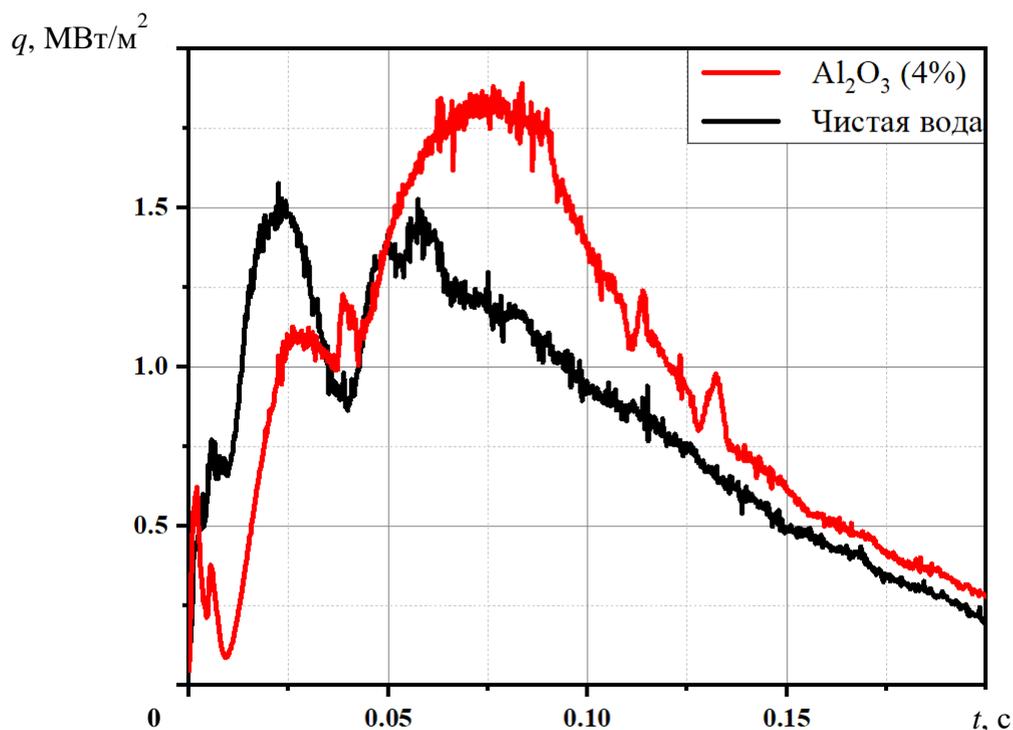


Рис. 3.2.13. Зависимость ПТП от времени для чистой воды и для Al_2O_3 (4%)

Относительно чистой воды наблюдается незначительное увеличение. Значения ПТП при пленочном кипении для чистой воды и для наножидкости соизмеримо, при этом ПТП для переходного режима в воде с добавлением наночастиц Al_2O_3 снизилось по сравнению со значениями для чистой воды.

По результатам экспериментов для температурного режима $T_w = 464$ °С, $T_f = 80$ °С так же, как и для предыдущего температурного режима, построен график зависимости относительных значений критических ПТП от концентрации частиц Al_2O_3 в воде (рис. 3.2.14).

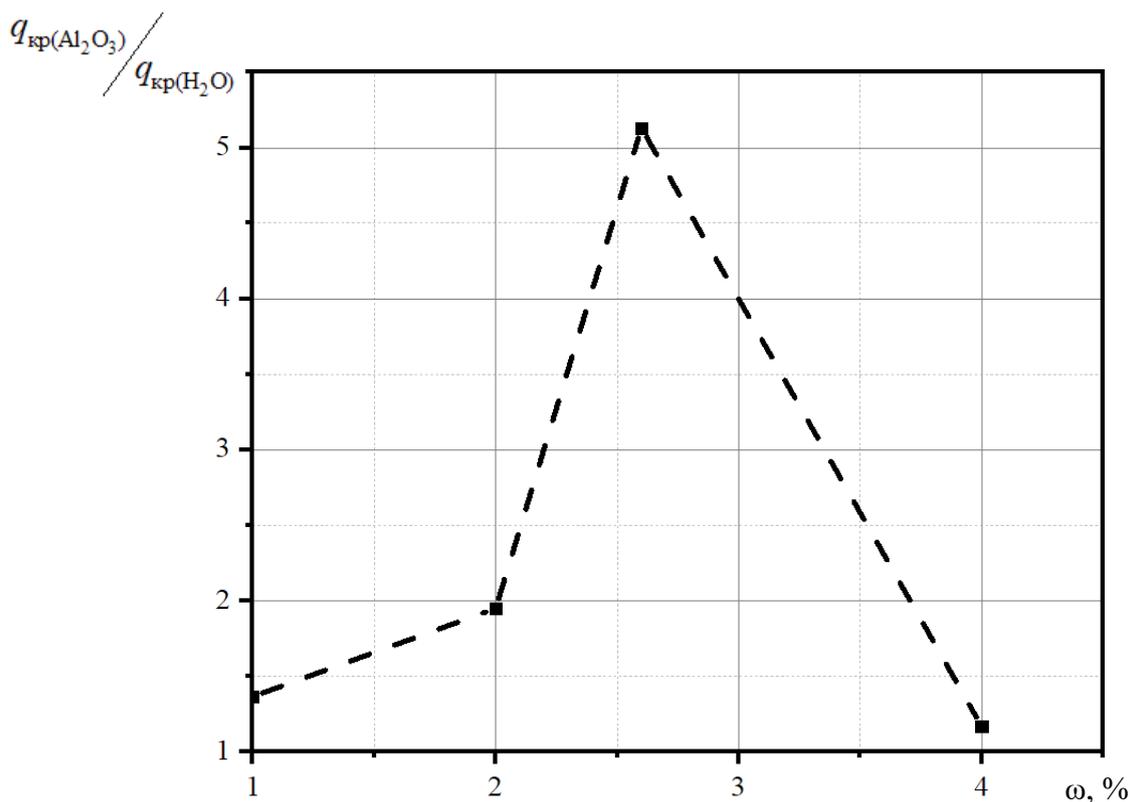


Рис. 3.2.14. График зависимости относительной критической ПТП от концентрации частиц Al_2O_3 ($T_w = 464$ °C; $T_f = 80$ °C)

Аналогично предыдущему режиму, добавление частиц Al_2O_3 к воде интенсифицирует теплообмена во всем диапазоне концентрация (1 – 4 %). Оптимальной массовой концентрацией Al_2O_3 в воде является 2,6%, при которой критическая ПТП возрастает в 5,1 раза относительно чистой воды и составляет 7,9 МВт/м².

3.2.3. Обобщение результатов

По данным, полученным в предыдущем разделе, оценим влияние недогрева наножидкости на критическую ПТП. Для этого построим график критических значений $q(\omega)$ для рассмотренных режимов (рис. 3.2.15).

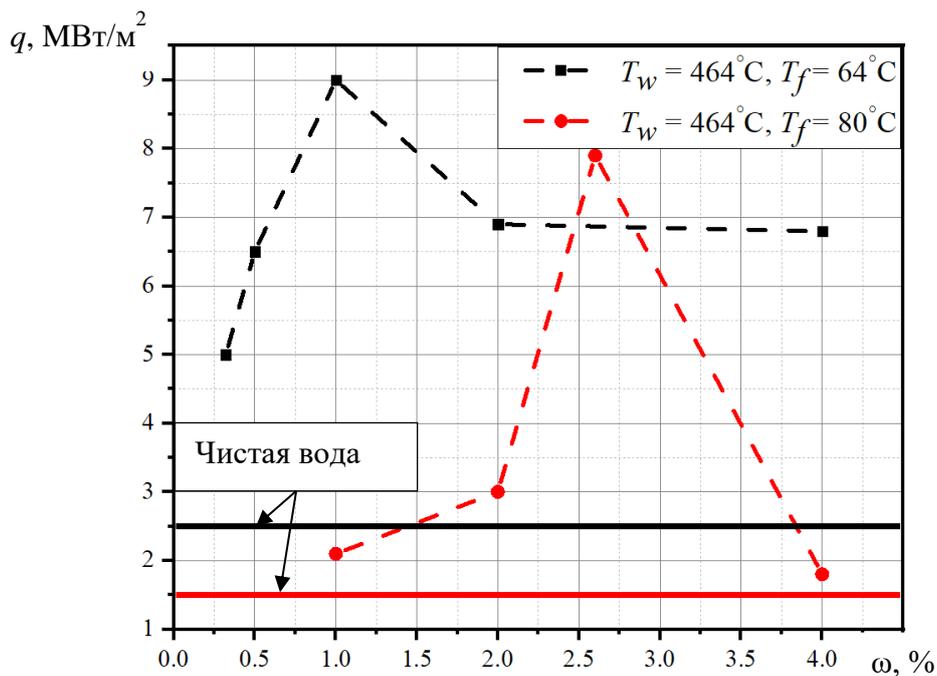


Рис. 3.2.15. График зависимости критической ПТП от концентрации частиц Al_2O_3

Горизонтальными линиями обозначены критические ПТП в чистой воде для двух общих режимов. Несмотря на малое значение критической ПТП для воды с температурой $T_f = 80^\circ\text{C}$, оптимальное значение при концентрации частиц 2,6 % соизмеримо со значениями для оптимальной концентрации 1 % в воде с температурой $T_f = 64^\circ\text{C}$.

Общий уровень интенсификации теплообмена при кипении выше при большем недогреве жидкости.

Совместим значения $q(\omega)$, представленные на рис. 3.2.8 и 3.2.14 (рис.3.2.16).

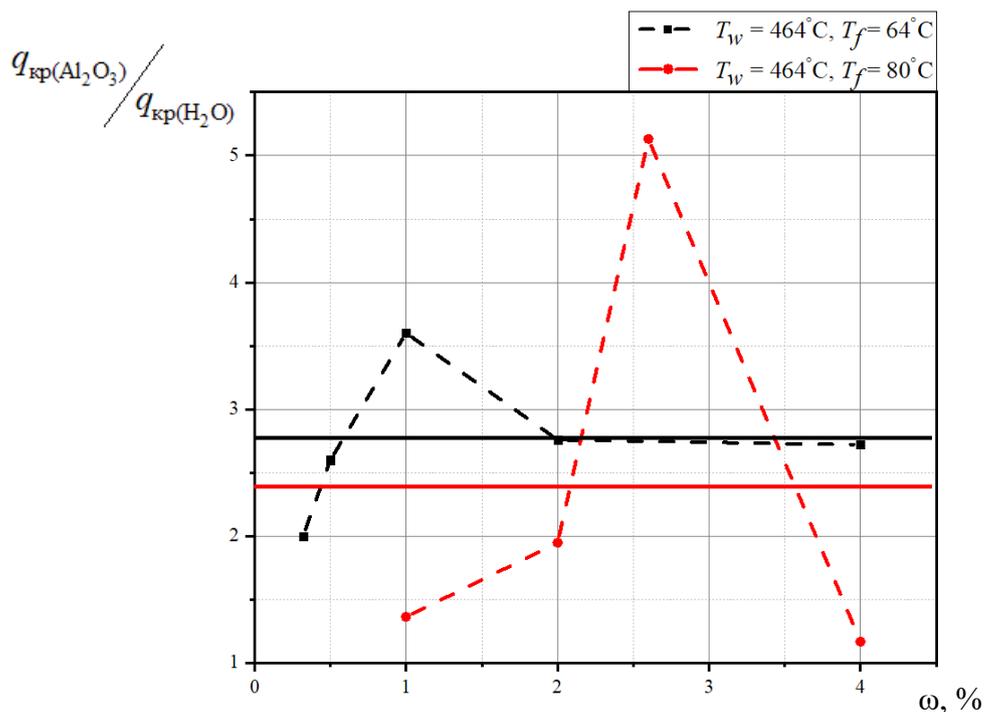


Рис. 3.2.16. График зависимости относительной критической ПТП от концентрации частиц Al_2O_3

Видно, что средний уровень интенсификации теплообмена при кипении в жидкости с большим недогревом выше, чем при меньшем недогреве. Пиковое значение относительной критической ПТП для температурного режима $T_w = 464^\circ\text{C}; T_f = 80^\circ\text{C}$ в 1,44 раза выше, чем для температурного режима $T_w = 464^\circ\text{C}; T_f = 64^\circ\text{C}$.

Следовательно, недогрев жидкости с добавлением частиц Al_2O_3 напрямую влияет на общую интенсификацию теплообмена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были выполнены все поставленные задачи:

- 1) изучены основные работы, посвященные интенсификации теплообмена при кипении воды с добавлением нанопорошка Al_2O_3 ;
- 2) исследована интенсификация теплообмена при кипении ненасыщенной наножидкости при температурных режимах $T_w = 464$ °С; $T_f = 64$ °С и $T_w = 464$ °С; $T_f = 80$ °С и концентрациях наночастиц от 0,32 до 4 %;
- 3) получена зависимость значений критических ПТП от температурного напора и массовой концентрации Al_2O_3 ;
- 4) найдены концентрации нанопорошка Al_2O_3 , при которых наблюдается наибольшее увеличение значений критических ПТП.

Изучив работы, посвященных интенсификации теплообмен при кипении с использованием наножидкостей, можно сказать, что однозначного ответа до сих пор не получено на то, как именно и за счет чего происходит интенсификация. Все это говорит о многофакторности рассматриваемого вопроса, а также о нехватке экспериментальных данных.

Рассмотренные в работе температурные режимы наиболее явственно демонстрируют все три режима кипения, в связи с чем можно изучить влияние наночастиц на теплообмен при полном процессе кипения.

Полученная зависимость критической ПТП от температурного напора и массовой концентрации Al_2O_3 позволяет предположить, что при меньшем недогреве наножидкости пик наибольшего значения критической ПТП будет сдвигаться в сторону большей концентрации. Однако данное предположение требует дальнейшего изучения и получения большего количества экспериментальных данных.

В работе рассмотрен лишь один из механизмов интенсификации теплообмена при кипении. В дальнейших исследованиях возможно совмещение нескольких механизмов интенсификации теплообмена при кипении, к примеру

использование наножидкости при кипении около неизотермических поверхностей. Также возможно проведение исследований по изучению влияния наножидкостей на основе иных наночастиц (Ti_2O , Si_2O , CuO) на теплообмен при кипении. Результатом стало подтверждение работоспособности метода градиентной теплотометрии при исследованиях кипения в большом объёме жидкости. Данные работы согласуются с результатами других исследователей при сопоставимых условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов, А. В. / Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении. Теплоэнергетика, 2019, № 12, с. 18–54.
2. Nukiyama, S. / The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure / Nukiyama, S // Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, № 7, pp. 959–970.
3. Sarit, K. Das / Pool boiling characteristics of nano-fluids / Sarit K. Das, Nandy Putra, Wilfried Roetzel // Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2003, vol. 46, pp 851–862.
4. You, S. M. /Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heattransfer/ You S. M., Kim J. H., Kim K. H. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 3374–3376.
5. Mackenzie, D. S. / History of Quenching, International Heat Treatment and Surface Engineering 2, 2008, pp. 68-73.
6. Riznic, J. / Introduction to Steam Generators – from Heron of Alexandria to Nuclear Power Plants: Brief History and Literature Survey, in Steam Generators for Nuclear Power Plants // Editor: J. Riznic, Elsevier Science, 2017.
7. Leidenfrost, J. G. / *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus* (A tract about some qualities of common water, 1756) / Duisburg on Rhine-An original copy of this Treatise is in the Yale University Library.
8. Вилемас, Ю.В. / Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи 2 / Вилемас Ю. В., Воронин Г. И., Дзюбенко Б. В., и др.; под ред. проф. Жукаускаса А. А. и проф. Калинина Э. К.// Вильнюс: Мокслас, 1988, 188 с.
9. Дзюбенко, Б. В. / Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике / Дзюбенко Б. В., Кузьма-Кичта Ю. А., Кутепов А. М. и др.; под ред. проф. Ю. А. Кузьма-Кичты // М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2003, 232 с.
10. Bang, I. C. / Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nano-fluids from a plain surface in a pool / Bang I.C., Chang S.H. // Inter. J. Heat Mass Tran., 2005., vol. 48., pp. 2407–2419.

11. Wen, D.S. / Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids / Wen D. S., Ding Y. L. // J. Nanopart. Res. 2005, a., vol. 7, pp 265–274.
12. Терехов, В. И. / Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен / Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. // Теплофизика и аэромеханика, 2010, том 17, № 2, с 173–188.
13. Sapozhnikov S. Z. / Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement / Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu. // St.-Petersburg: Springer International Publishing, 2020, p 209.
14. Митяков, В.Ю. / Использование поперечного эффекта Зеебека для измерения мгновенного значения теплового потока на вертикальной нагретой поверхности в условиях свободноконвективного теплообмена [Текст] / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников, Ю.С. Чумаков // ТВТ, 2002, т. 40, №4, с 669 – 674.
15. Митяков, В.Ю. / Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук: 01.04.14 / В.Ю. Митяков. СПб, 2005. 239 с.
16. Митяков, А.В. / Градиентные датчики теплового потока в нестационарной теплометрии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / А.В. Митяков. СПб, 2000. 134 с.
17. Митяков, В. Ю. / Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель/ В. Ю. Митяков, А.В. Павлов, П.Г. Бобылев // Неделя Науки СПбПУ 2019: 29-ая Всерос. конф.: СПбПУ, 2019.
18. Knauss, H. / Calibration experiments of a new active fast response heat flux sensor to measure total temperature fluctuations. Pt I. Introduction to the problem. / Knauss H., Gaisbauer U., Wagner S., Buntin D., Maslov A., Smorodsky B., Betz J. // In Proc. Intern. Conf. on the Methods of Aerophys, 2002, pp. 632–643.
19. Неопределённость измерения. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98- 1:2009.

20. Sapozhnikov, S. Z. / Gradient heatmetry in study of boiling on spherical surface // Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Pavlov A. V., Bobylev P. G., Vinogradov M. D. // Journal of Physics: Conference Series, vol 1867, 2021, p 7.
21. Saburo Toda / Subcooled film boiling and the behavior of vapor film on a horizontal wire and a sphere / Saburo Toda, Michitsugu Mori // In: Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, 1982., P. 173 – 178.
22. Кутателадзе, С. С. / Основы теории теплообмена: издание 5-е, переработанное и дополненное. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
23. Sapozhnikov, S. Z. / Gradient heatmetry for boiling of underheated water on spherical surface // Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Pavlov A. V., Bobylev P. G. // Journal of Physics: Conference Series, vol 1683, 2020, p 7.
24. АО «НПП «Эталон» – Малоинерционная трубчатая печь с терморегулятором МТП-2МР, информационная брошюра – [Электронный ресурс]: URL: https://omsketalon.nt-rt.ru/images/manuals/mtp_2mr.pdf (дата обращения 01.05.21).

Малоинерционная трубчатая печь с терморегулятором МТП-2МР [24]



МТП-2МР сертифицированы в составе установки УПСТ-2М.
Зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под № 16173-02
Сертификат об утверждении типа средств измерений RU.C.32.051.A № 13369.

МТП-2МР

Назначение:

Малоинерционная трубчатая печь МТП-2МР предназначена для нагрева средств измерения температуры в диапазоне от 100 до 1200°C в лабораторных условиях при их поверке, калибровке, испытаниях.

Печь МТП-2МР состоит из печи МТП-2М и блока управления (терморегулятора) БУ-7-4.

МТП-2МР выпускается по ТУ 50-96 ДДШ 1.298.000 ТУ

Характеристики	МТП-2МР-50-500	МТП-2МР-70-1000
Диапазон воспроизводимых температур, °С	100...1200	
Принцип работы	печь сопротивления горизонтального типа	
Используемая печь	МТП-2М-50-500	МТП-2М-70-1000
Используемый терморегулятор*	БУ-7-4	
Номинальные размеры рабочего пространства, мм	Ø 50, длина 500	Ø 70, длина 1000
Температурный градиент в средней части, °С/см, не более	0,8	
Нестабильность поддержания заданного температурного режима, °С/мин, не более	0,1	
Время разогрева до максимальной температуры, мин, не более	90	
Вид климатического исполнения по ГОСТ 15150-69	УХЛ4.2	
Питание	~ 220 В; 50 Гц	
Потребляемая мощность, кВт, не более:		
- печи	5	8
- терморегулятора	0,022	
Габаритные размеры, мм, не более:		
- печи	730x200x350	1230x200x350
- терморегулятора	270x100x360	
Масса, кг, не более:		
- печи	16	39
- терморегулятора	4,5	
* - возможна поставка печи без терморегулятора		



МТП-2М



БУ-7-4

Комплектность:

Наименование изделия	Количество для печи	
	МТП-2МР-50-500	МТП-2М-70-1000
печь МТП-2М-50-500	1 шт.	-
печь МТП-2М-70-1000	-	1 шт.
блок управления БУ-7-4	1 шт.	1 шт.
кабель ХТ1 ДДШ 6.644.004	1 шт.	1 шт.
кабель ХТ3 ДДШ 6.644.033	1 шт.	1 шт.
трубка кварцевая 25x2.5x620 ТУ 5932-014-00288679-01	1 шт.	-
трубка кварцевая 25x2.5x1000 ТУ 5932-014-00288679-01	-	1 шт.
программное обеспечение "Termocontrol" 643.02566540.00019-01	1 комплект	1 комплект
паспорт ДДШ 1.298.000 ПС	1 экз.	1 экз.
Примечание - По согласованию с предприятием-изготовителем потребитель может дополнительно заказать для МТП-2МР-50-500 никелевый выравнивающий блок длиной 140 мм по чертежам (заказам) потребителя.		