

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ
И ЖИДКОСТИ С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРОЧАСТИЦ Al_2O_3 ¹

© 2023 г. А. В. Павлов^а, *, П. Г. Бобылев^а, С. З. Сапожников^а

^аСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия

*e-mail: pavlovav196@mail.ru

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 08.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Рассмотрен теплообмен при кипении в большом объеме недогретой чистой воды и воды с добавлением микрочастиц Al_2O_3 . Представленный краткий литературный обзор свидетельствует о явно недостаточной экспериментальной базе, без которой невозможно говорить о прямой зависимости критической плотности теплового потока от концентрации частиц в жидкости. Используемые в рассмотренных публикациях методы исследования теплообмена при кипении не дают полного представления о всем процессе и не позволяют сделать однозначных выводов. В настоящей работе основным методом исследования являлась градиентная теплотметрия. Применявшиеся гетерогенные градиентные датчики теплового потока позволили напрямую получить местные значения плотности теплового потока (ПТП) и показали себя как надежный инструмент при изучении фазовых переходов при нестационарной постановке задачи. В статье рассмотрены три температурных напора: 384, 391 и 400 °С, выбранных исходя из ресурса модели (времени бесперебойной работы модели и первичных преобразователей) и ввиду устойчивого пленочного режима кипения, характерного для критических значений ПТП. Во всем исследованном диапазоне массовых концентраций микрочастиц Al_2O_3 от 1 до 4% наблюдалась интенсификация теплообмена при кипении недогретой воды при атмосферном давлении. Критическая ПТП для рассмотренных температурных напоров оказалась в 3.6–5.1 раза выше, чем для чистой воды. Для каждого температурного режима выявлены оптимальные концентрации микрочастиц (частиц) Al_2O_3 , соответствующие максимуму ПТП. Увеличение критической температуры во всех режимах и, как следствие, местной ПТП предположительно связано с изменением теплофизических свойств взвеси и возмущениями, вносимыми этими частицами в процесс кипения.

Ключевые слова: градиентная теплотметрия, гетерогенные градиентные датчики теплового потока, местная плотность теплового потока, критическая температура, микрочастицы Al_2O_3

DOI: 10.56304/S0040363623030062

Ввиду хаотичности кипения значительная часть данных о нем основана на модельных соотношениях и эмпирических зависимостях. Благодаря обширной экспериментальной базе, собранной зарубежными и отечественными исследователями, удалось, в частности, обобщить представления о теплообмене при кипении в большом объеме воды и других жидкостей [1]. Однако полученные критериальные зависимости не могут достаточно полно описать двухфазную систему с вероятностными законами, процессами и множеством неустойчивых состояний [2].

Интенсификация теплообмена при кипении актуальна, и для дальнейшего ее изучения требу-

ется развитие и углубление эксперимента на новой инструментальной базе.

Настоящая работа посвящена теплообмену при кипении в большом объеме чистой воды, а также воды с добавлением микрочастиц Al_2O_3 . Основной метод исследования – градиентная теплотметрия.

Интенсификация теплообмена при кипении активно изучается с середины прошлого века. Интерес к ней связан с развитием высокопроизводительных агрегатов и устройств, требующих отвода тепловых потоков высокой плотности. Результаты исследований 60–80-х годов XX в. представлены в обширных обзорных работах [3, 4].

С началом нового века появились работы, посвященные добавлению нано- и микрочастиц в качестве интенсификаторов теплообмена при кипении.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (№ 22-29-00160). <https://rscf.ru/project/22-29-00160/>.

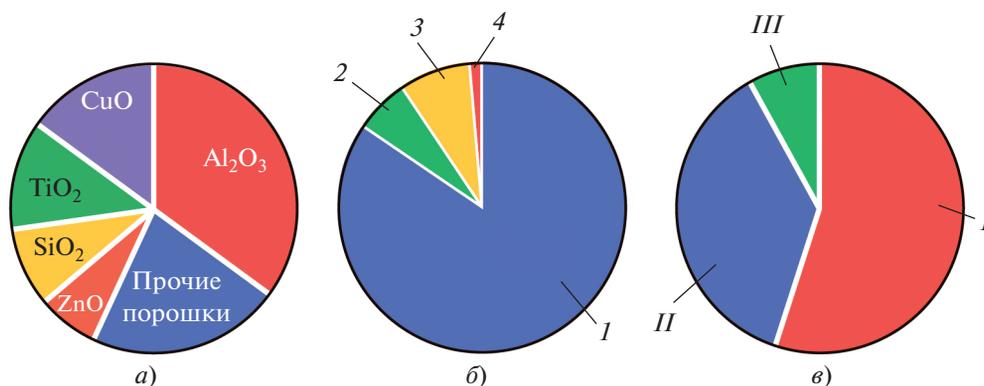


Рис. 1. Распределение опубликованных работ по использованным в них наножидкостям [10].

a – нанопорошки; *б* – базовые жидкости; *в* – полученные результаты.

Базовые жидкости: *I* – вода; *2* – хладагенты; *3* – смесь воды с этиленгликолем; *4* – другие жидкости.

I, II – увеличение и снижение ПТП и коэффициента теплоотдачи соответственно; *III* – результаты неоднозначны

В [5, 6] представлены исследования кипения насыщенной воды с добавлением частиц Al_2O_3 с объемной концентрацией 0.5–4.0% при атмосферном давлении. Было отмечено противоречивое влияние частиц на теплообмен: плотность теплового потока с ростом концентрации частиц увеличивалась, а коэффициент теплоотдачи уменьшался.

За 20 лет исследований в этой области так и не удалось прийти к единому мнению о причинах интенсификации теплообмена при кипении жидкости с добавлением нано- и микрочастиц. В работе [7] экспериментально изучены теплопроводность и вязкость наножидкостей на основе частиц Al_2O_3 . Автор считает, что применение наножидкостей не является перспективным способом интенсификации, однако в работе [8], наоборот, сделан вывод об эффективности использования таких жидкостей в теплообменных процессах. При этом в [8] отмечается важность подготовки наножидкостей для достижения их стабильности и снижения осадений при эксплуатации.

По результатам исследований, посвященных различным наножидкостям, написаны обзорные статьи [9, 10], где, несмотря на популярность данного направления и большое разнообразие используемых наночастиц и исходных жидкостей, преобладают работы, посвященные интенсификации теплообмена при кипении с добавлением частиц Al_2O_3 (35%) к воде (84%). Только в 55% рассмотренных в [9, 10] работ отмечено увеличение критической ПТП и коэффициента теплоотдачи. В 37% публикаций говорится об ухудшении этих параметров при добавлении наночастиц, а в 8% оставшихся однозначный результат не наблюдался [10]. На рис. 1 приведены круговые диаграммы, отражающие информацию об используемых частицах и базовых жидкостях, представленную в публикациях по наножидкостям, а также полученные результаты исследований.

Противоречивость данных усугубляется отсутствием методики прямого измерения ПТП при кипении и многофакторным влиянием частиц на теплообмен.

До последнего времени основным методом исследования оставалась термометрия с использованием термопар для определения температурного напора. Методика успешно применяется научной группой В.В. Ягова [11]. В качестве экспериментальной модели используется шар из стали диаметром 39 мм с пятью установленными на полярных координатах хромель-алюмелевыми (типа К) термопарами (50, 90, 135 и 180°) и одной термопарой в центре шара [12]. Такой подход позволяет оценить лишь среднюю ПТП со всеми ограничениями, накладываемыми решением обратной задачи теплопроводности.

В СПбПУ с 1996 г. ведутся работы по исследованию теплообмена с помощью нового метода – градиентной теплотметрии, которая успешно применяется в прикладных задачах, что позволяет определять местную ПТП. Изучен теплообмен в камере сгорания дизельного двигателя [13], при обтекании гладких и оребренных цилиндров [14], конденсации водяного пара [15] и в других задачах. Градиентная теплотметрия применяется и в исследовании теплообмена при кипении воды в большом объеме [16].

Совмещение градиентной теплотметрии с высокоскоростной визуализацией кипения в чистой воде позволило получить местные значения ПТП на поверхности шара, сопоставить полученные данные с гидродинамикой процесса и определить границы основных режимов кипения [17].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика измерения плотности теплового потока – градиентная теплотметрия – базируется на использовании градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), реализующих поперечный эф-

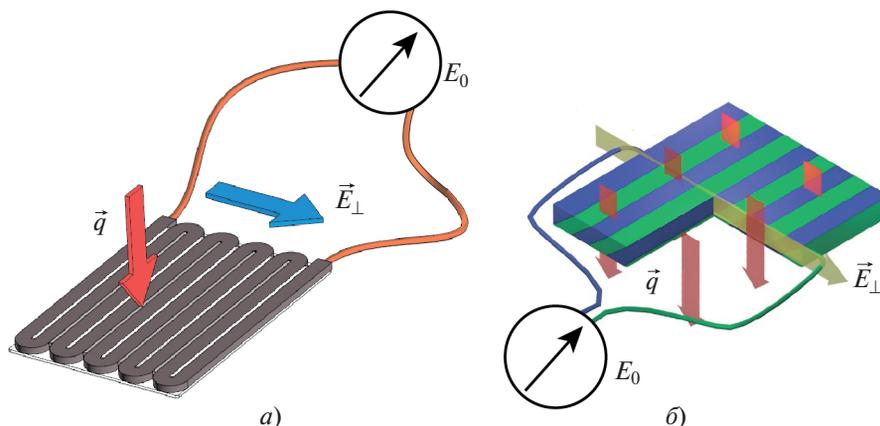


Рис. 2. Принципиальная схема датчиков теплового потока.

a – ГДТП на основе анизотропного монокристалла висмута; *б* – ГГДТП из меди и никеля.

E_{\perp} – поперечная составляющая термоЭДС, которую вырабатывает датчик теплового потока, пропорциональная проходящему через него тепловому потоку

фект Зеебека в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоЭДС. В анизотропной среде, через которую проходит тепловой поток (рис. 2, *a*), появляется поперечная составляющая его вектора. Формула связи термоЭДС E_0 с плотностью теплового потока q имеет вид

$$E_0 = S_0 A q,$$

где S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; A – площадь верхней поверхности ГДТП, м²; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Главная особенность ГДТП – их аномально низкая постоянная времени (10^{-8} – 10^{-9} с), из-за которой градиентная теплотометрия практически безынерционна [18].

На основе композиции из металлических компонентов созданы гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП), термостойкость которых превышает 1500 К [19]. Эта модификация (рис. 2, *б*) использовалась в данной работе.

Градуировка ГГДТП проводилась на специально созданном стенде [20] и уточнялась по месту монтажа. Относительная расширенная неопределенность градуировки не превышает 4%.

В отличие от ГДТП на основе висмута, вольт-ваттная чувствительность ГГДТП с биометаллической структурой (на основе композиции металлических компонентов) зависит от температуры датчика. По результатам градуировки была получена вольт-ваттная зависимость ГГДТП из меди и никеля от температуры.

Зависимость вольт-ваттной чувствительности ГГДТП из меди и никеля от температуры имеет следующий вид:

$$S_0 = 4.7806 e^{-0.011 t_{\text{ГДТП}}},$$

где $t_{\text{ГДТП}}$ – температура ГГДТП, °С.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Экспериментальной моделью служил шар диаметром 34 мм, изготовленный из титана ВТ22. Гетерогенный градиентный датчик теплового потока размерами $3.0 \times 3.0 \times 0.3$ мм установлен на одном уровне с поверхностью модели в выборке размерами $5.0 \times 5.0 \times 0.5$ мм, на которой имеются два отверстия диаметром 1.5 мм для вывода проводов (рис. 3). Датчик закреплен в выборке с помощью высокотемпературного компаунда.

Для электрической изоляции ГГДТП от поверхности модели использовалась слюда. Тепловой контакт ГГДТП с подложкой обеспечила термопа-

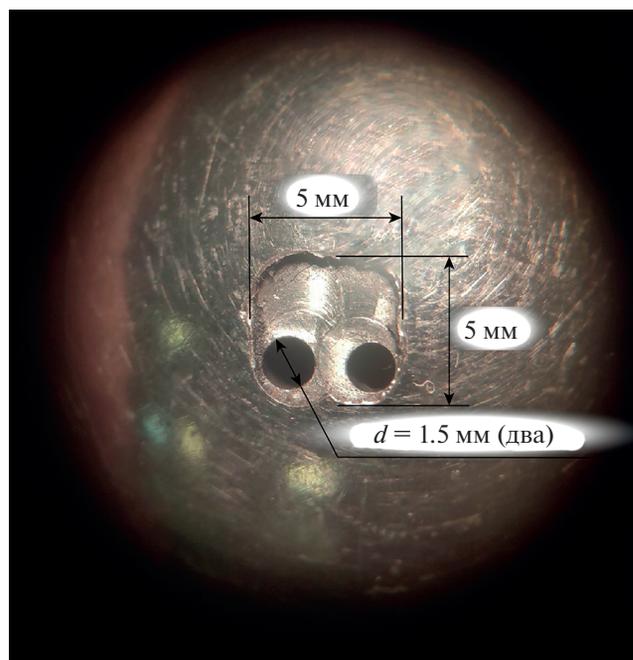


Рис. 3. Выборка для установки ГГДТП

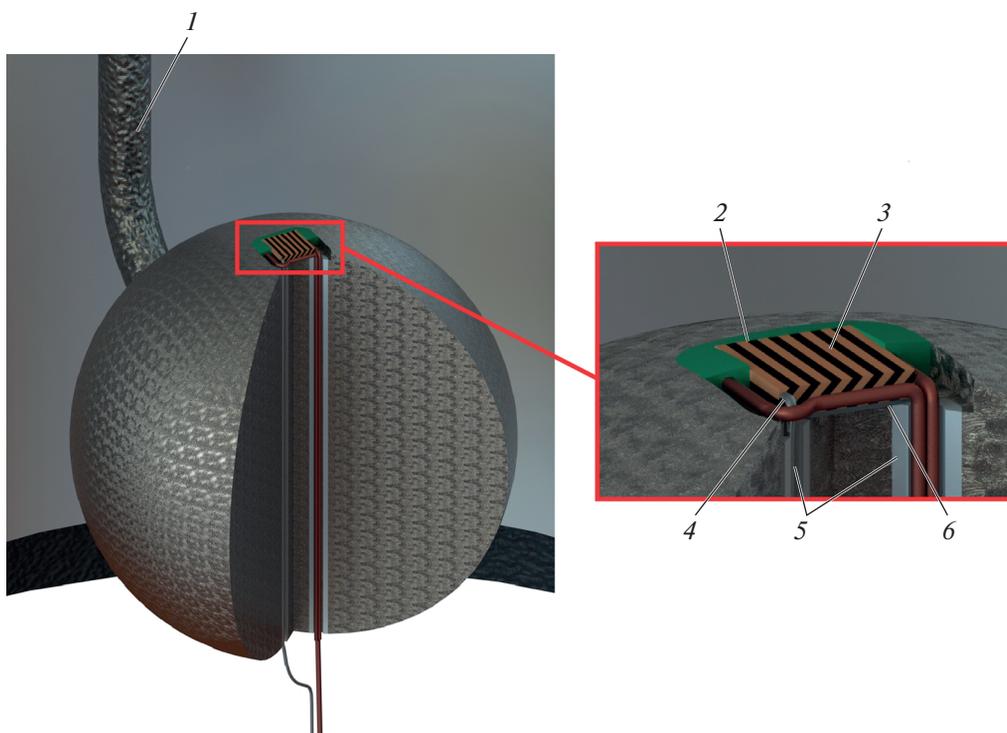


Рис. 4. Схема экспериментальной модели с ГДТП и термопарами.
 1 – державка; 2 – компаунд; 3 – ГДТП; 4 – термопара ГДТП; 5 – керамические трубки; 6 – термопаста

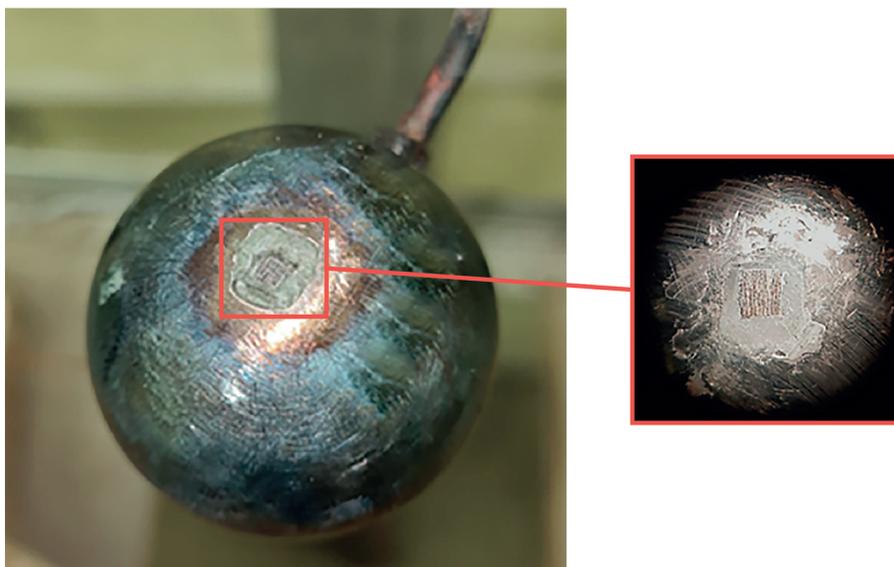


Рис. 5. Готовая экспериментальная модель с ГДТП

ста (рис. 4). Для работы необходимо подбирать материалы с близкой теплопроводностью, чтобы не было искажений в температурном поле. Так, теплопроводности титана ВТ22 [$\lambda = 9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] и термопасты [$\lambda = 11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] сопоставимы. На рис. 4 представлена модель с ГДТП и термопарами.

Провода к ГДТП присоединены с помощью точечной лазерной сварки. На рис. 5 показана модель после термической обработки компаунда и шлифовки.

Тепловизионная съемка нагретой и зачерненной модели с установленным ГДТП не выявила

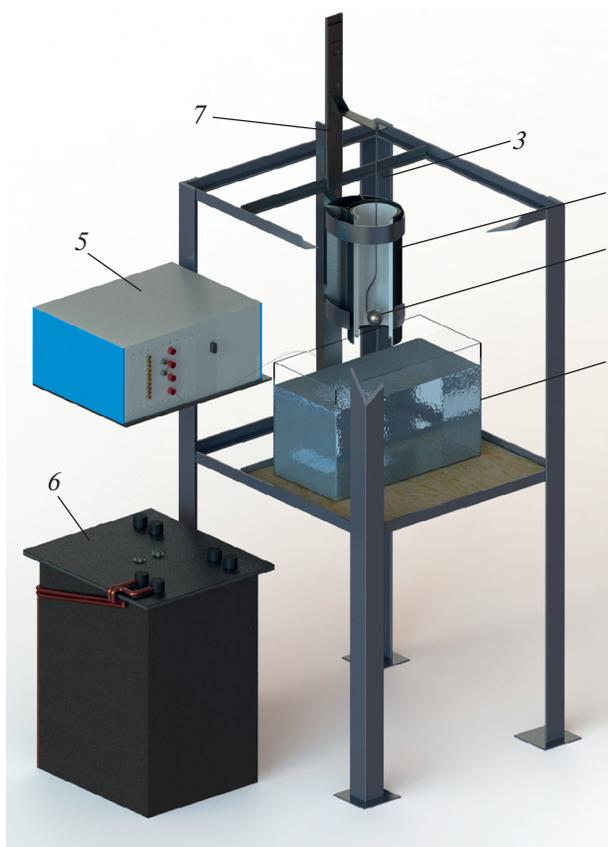


Рис. 6. Схема экспериментальной установки. 1 – исследуемый образец; 2 – печь; 3 – державка; 4 – аквариум; 5 – измерительно-вычислительный комплекс; 6 – трансформатор печи; 7 – ползья для перемещения модели

неравномерности в поле температуры на шаровой поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Чтобы определить местную ПТП при кипении, необходимо измерять температуру поверхности модели, а также контролировать равномерность предварительного прогрева шара. В модели расположены спаи двух термопар: в ядре шара и на его поверхности, находящейся в непосредственном контакте с ГГДТП.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.

Исследуемый образец помещается в проходную печь и фиксируется в ней державкой. Сигналы ГГДТП и термопар записываются на измерительно-вычислительный комплекс модели NIPXI-1050 с частотой записи 5000 измерений в 1 с. При достижении необходимой температуры модели державка высвобождается, и образец погружается в аквариум вместимостью 10 дм³. Температура воды поддерживается омическим нагревателем и отслеживается мультиметром с термопарой модели Fluke 289.

ОБЪЕКТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах реализованы три температурных режима: при температуре поверхности шара $t_w = 464^\circ\text{C}$ и температуре воды $t_f = 64^\circ\text{C}$, $t_w = 464^\circ\text{C}$ и $t_f = 73^\circ\text{C}$, $t_w = 464^\circ\text{C}$ и $t_f = 80^\circ\text{C}$.

Для оценки интенсификации следует рассмотреть северный полюс шара, так как там будет наименьшее увеличение ПТП по сравнению с оставшейся поверхностью, поскольку форма модели исключает концевые эффекты. Предварительные эксперименты с насыщенной водой (рис. 7) показали, что при пленочном режиме кипения на северном полюсе шар полностью покрыт пленкой. Этот вывод подтвердила высокоскоростная съемка процесса [16].

На рис. 7 видно, что критические значения ПТП как на северном, так и на южном полюсе соответствуют диапазону второй критической ПТП $q_{кр2} = 0.46\text{--}0.63$ МВт/м² (диапазон I) [21]. В экспериментах с недогревом воды на 50 и 75^oC получены значения ПТП, превышающие 20 МВт/м² [16]. Однако такой недогрев жидкости не позволяет возникнуть устойчивому пленочному кипению, без которого говорить о критических значениях ПТП нельзя.

Эксперимент показал, что температура модели 464^oC при кипении в насыщенной и недогретой воде увеличивает ресурс модели и обеспечивает устойчивое пленочное кипение при рассматриваемых недогревах жидкости [17]. Сочетание в экс-

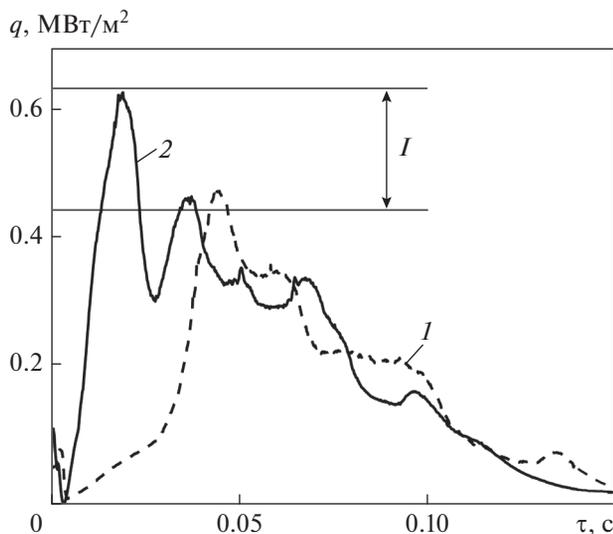


Рис. 7. Временные теплограммы северного (0°) 1 и южного (180°) 2 полюсов модели ($t_{w0} = 300^\circ\text{C}$, $t_{f0} = 100^\circ\text{C}$) [16]. I – диапазон второй критической ПТП $q_{кр2}$ (0.46–0.63 МВт/м²); τ – время

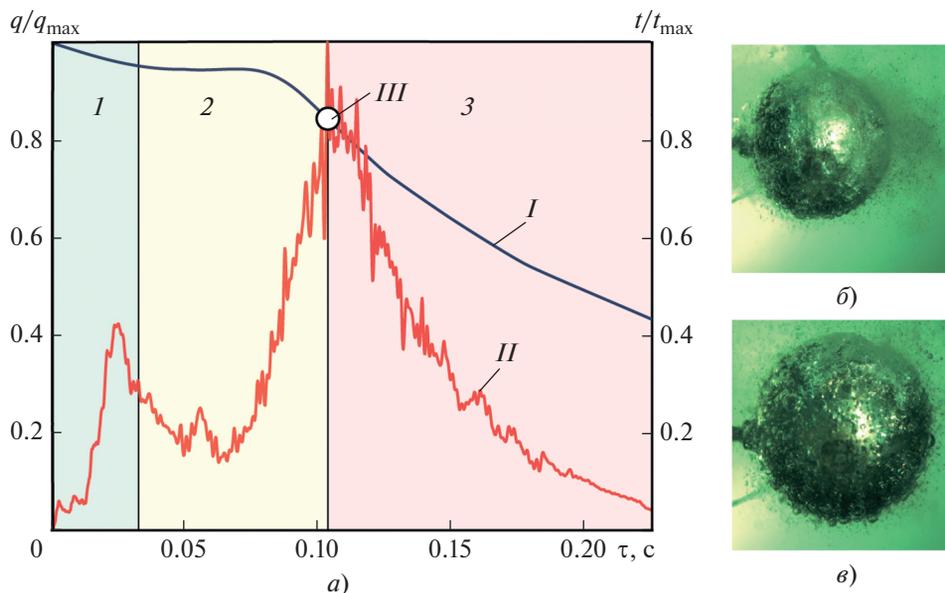


Рис. 8. Временная теплограмма (а) и визуализация переходного режима кипения (б) и пузырькового кипения (в) в чистой воде.
 Графики: *I* – безразмерной температуры t/t_{max} ; *II* – мгновенной ПТП q/q_{max} для температурного режима $t_w = 464^\circ\text{C}$, $t_f = 64^\circ\text{C}$; *III* – максимум ПТП.
 Режим кипения: *I* – пленочный; *2* – переходный; *3* – пузырьковый

перименте теплотметрии, термометрии и высокоскоростной визуализации (запись производилась на высокоскоростную камеру Evercam 1000-4-С с частотой 1000 кадров в 1 с) дает возможность напрямую отследить связь местной ПТП с температурой модели: критическая температура соответствует максимуму ПТП (т. III на рис. 8) [22]. Пульсации на теплограмме (см. рис. 8) связаны с зарождением пузырей и их срывом с поверхности датчика теплового потока. Отсутствие высокочастотных пульсаций объясняется быстродействием установленной на поверхности шара термопары. Физичность полученных на теплограмме пульсаций подтверждает и высокоскоростная визуализация. Изменение местной ПТП позволяет оценить зоны и время существования всех режимов кипения без визуализации (пленочного кипения, переходного режима и пузырькового кипения), что важно при исследовании непрозрачных жидкостей.

Влияние недогрева воды Δt на местную ПТП иллюстрирует рис. 9.

Критическая ПТП увеличивается вследствие раннего разрушения пленки и контакта перегретой поверхности с водой. В табл. 1 приведены критические температуры при различных недогревах Δt чистой воды.

Для экспериментов с микрочастицами Al_2O_3 использовалась их взвесь в воде с массовыми концентрациями этих частиц 1.0, 2.0, 2.6 и 4.0%.

При отсеве порошка максимальный размер частиц не превышал 64 мкм (рис. 10).

При добавлении Al_2O_3 в воду при всех концентрациях наблюдалось либо улучшение теплосъема, либо отсутствие эффекта интенсификации теплообмена. Отрицательное воздействие, о котором говорится в работе [23], не было выявлено. В качестве примера на рис. 11 для сравнения представлены временные теплограммы при начальной температуре модели $t_{w0} = 464^\circ\text{C}$ и $t_f = 64^\circ\text{C}$. Штриховой линией показано изменение

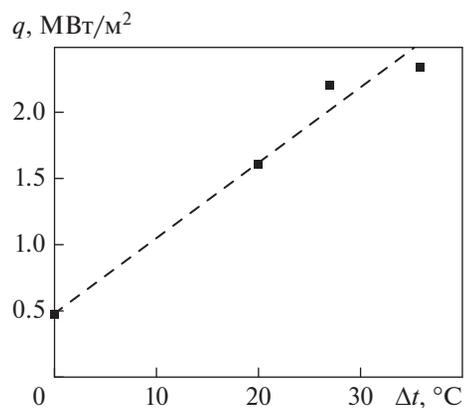


Рис. 9. Зависимость местной ПТП от недогрева воды ($\Delta t = 100 - t_f$). Точки – экспериментальные значения критической плотности теплового потока

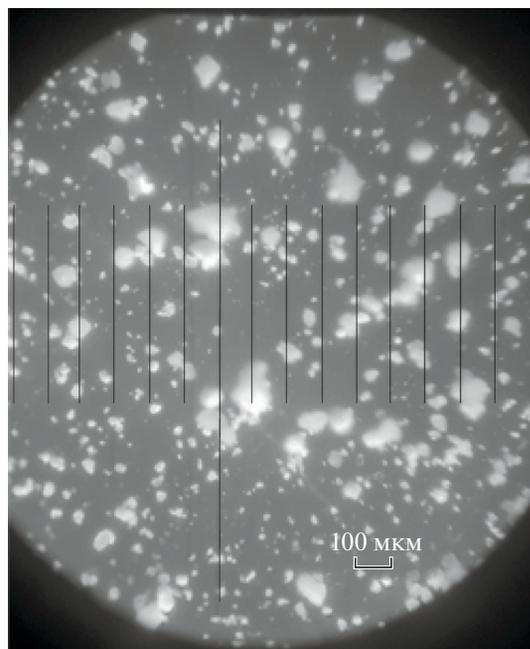


Рис. 10. Фотография просеянных частиц Al_2O_3

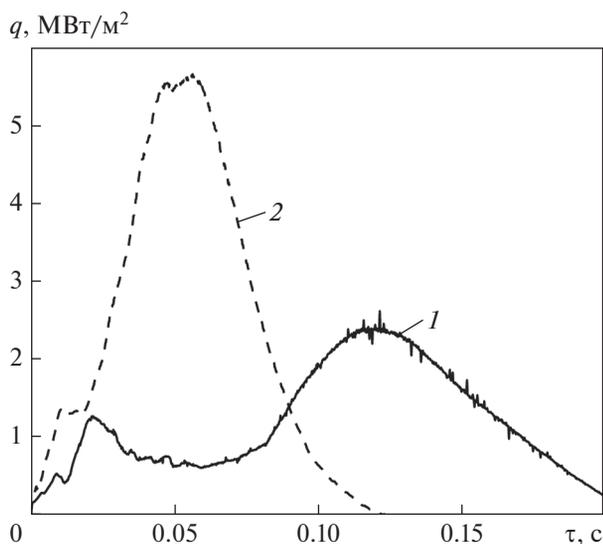


Рис. 11. Временная теплограмма при кипении в чистой воде (1) и в воде с добавлением частиц Al_2O_3 концентрацией 2.0% (2)

Таблица 1. Критические значения температуры при различных недогревах чистой воды (начальная температура модели $t_{w0} = 464^\circ\text{C}$)

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$
0	275	27	393
20	364	36	430

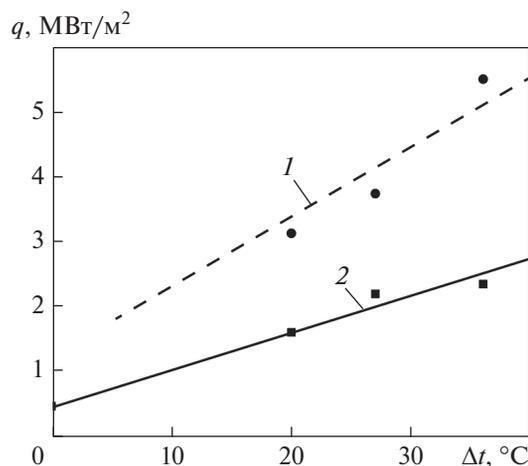


Рис. 12. Зависимость критической ПТП от недогрева воды ($\Delta t = 100 - t_f$).
1 – взвесь Al_2O_3 концентрацией 2.0%; 2 – чистая вода.
Точки – экспериментальные значения

местной ПТП при кипении недогретой воды с добавлением частиц Al_2O_3 массовой концентрацией 2.0%, сплошная кривая отражает местную ПТП при кипении чистой воды.

При концентрации микрочастиц 2.0% снижается время существования паровой пленки и возрастает ПТП. В рассматриваемых температурных режимах критические температуры разрушения пленки при кипении в чистой воде и с добавлением частиц различаются на 12°C . В результате раннего разрушения пленки критическая ПТП увеличивается, а время остывания уменьшается, что позволяет определить оптимальные концентрации частиц и найти максимум ПТП. Значения критических ПТП для взвеси Al_2O_3 концентрацией 2.0% выше, чем для чистой воды, т.е. без добавления частиц Al_2O_3 (рис. 12), но их зависимости от недогрева имеют схожий вид.

Обобщив данные по всем рассмотренным концентрациям, можно сделать вывод о положительном влиянии частиц Al_2O_3 на теплообмен при кипении (рис. 13).

На рис. 13 показана зависимость критической ПТП от недогрева жидкости в диапазоне от 36 до 20°C при различных концентрациях частиц оксида алюминия в ней. Для рассмотренных температурных режимов наблюдается оптимум, для которого характерен рост критической ПТП в 3.6–5.1 раза. Максимальные значения ПТП для рассмотренных режимов представлены в табл. 2. Они указывают на увеличение оптимальной массовой концентрации частиц во взвеси при уменьшении недогрева.

Рост критической температуры для всех режимов и, как следствие, повышение местной ПТП предположительно связаны с изменением тепло-

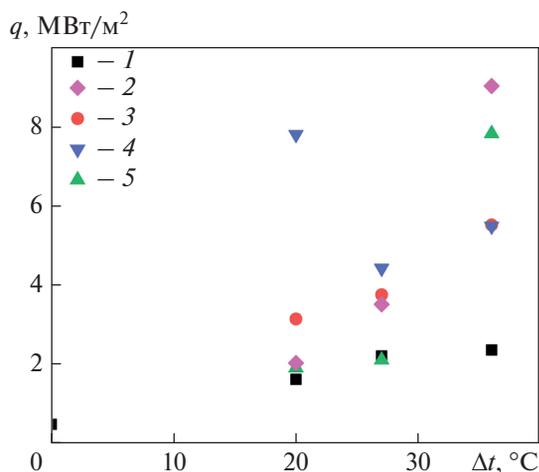


Рис. 13. Зависимость критической ПТП от недогрева жидкости при различных концентрациях частиц Al₂O₃. Концентрация частиц Al₂O₃, %: 1 – 0 (чистая вода); 2 – 1.0; 3 – 2.0; 4 – 2.6; 5 – 4.0

физических свойств взвеси и возмущениями, вносимыми частицами в процесс кипения. Сделать однозначный вывод о механизмах интенсификации можно будет после экспериментальной оценки свойств взвеси, что станет предметом дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Методом градиентной теплотметрии получены значения местной ПТП при кипении в большом объеме чистой воды и воды с микрочастицами Al₂O₃.

2. При добавлении микрочастиц Al₂O₃ к недогретой воде время протекания процесса сокращается, а интенсивность теплообмена увеличивается.

3. При температурных напорах в 384, 391 и 400 °C добавление микрочастиц Al₂O₃ с массовыми концентрациями от 1 до 4% интенсифицирует теплообмен при кипении недогретой воды при атмосферном давлении. Максимум ПТП связан как с концентрацией частиц, так и с температурными условиями эксперимента.

Таблица 2. Оптимальные концентрации частиц Al₂O₃ и значения критической ПТП для разных температурных режимов

Температурный режим	Оптимальная массовая концентрация ω, %	Значение критической ПТП q _{кр} , МВт/м ²
t _{w0} = 464 °C, t _{f0} = 64 °C	1.0	9.0
t _{w0} = 464 °C, t _{f0} = 73 °C	1.6	8.5
t _{w0} = 464 °C, t _{f0} = 80 °C	2.6	7.9

4. Дальнейшие исследования с использованием порошков разных фракционного состава и массовой концентрации позволят оценить перспективы интенсификации теплообмена при кипении в большом объеме недогретой воды с добавлением частиц различных оксидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики: Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Изд-во МЭИ, 2000.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
3. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи. Т. 2 / Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер, Е.В. Дубровский, А.А. Жукаускас, С.Г. Закиров, В.М. Иевлев, Э.К. Калинин, В.М. Шимонис, А.А. Шланчяускас, С.А. Ярхо. Вильнюс: Мокслас, 1988.
4. Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.М. Кутепов, И.П. Свириденко, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, В.В. Харитонов, А.П. Холпанов. М.: ЦНИИАтоминформ, 2003.
5. Sarit K.D., Nandy P., Wilfried R. Pool boiling characteristics of nano-fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. Is. 5. P. 851–862. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00348-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00348-4)
6. You S.M., Kim J.H., Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 3374–3376. <https://doi.org/10.1063/1.1619206>
7. Морозова М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2019.
8. Effect of concentration of Al₂O₃ nano particles in base fluid on thermal and flow properties to enhance the heat transfer rate / K. Basavaraj, K. Elangovan, S.N. Kulkarni, S. Shankar // Int. J. Eng. Res. Technol. 2021. V. 10. Is. 2. P. 106–112.
9. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2: Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 173–188.
10. A review on pool and flow boiling enhancement using nanofluids: nuclear reactor application / S. Mukherjee, S. Ebrahim, C.M. Purna, A. Naser, P. Chaudhur // Processes. 2022. V. 10. Is. 1. P. 177. <https://doi.org/10.3390/pr10010177>
11. Ягов В.В., Забилов А.Р., Лексин М.А. Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70–80. <https://doi.org/10.1134/S0040363615110119>
12. Effect of coating by a carbon nanostructure on heat transfer with unsteady film boiling / A.V. Dedov, A.R. Zabirov, A.P. Sliva, S.D. Fedorovich, V.V. Yagov // High Temperature. 2019. V. 57. Is. 1. P. 63–72. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19010048>
13. Research of heat transfer in combustion chamber of diesel engine on idle by gradient heat flux measurement method / A.V. Vintsarevich, A.V. Mityakov, D.V. Ger-

- asimov, M.V. Yamashkin // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1565. Is. 1. P. 012019.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012019>
14. **Gusakov A.A., Grekov M.A., Seroshtanov V.V.** Aerodynamics and heat transfer over the surface of a single circular fin // *Physics and Mathematics*. 2018. V. 11. Is. 2. P. 151–164.
<https://doi.org/10.18721/JPM.11214>
 15. **Searching** of the optimum tilt of the pipe at condensation by using gradient heatmetry / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, A.Y. Babich, E.R. Zainullina, A.V. Pavlov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. Is. 2. P. 022028.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022028>
 16. **Исследование** кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, А.А. Гусаков, А.В. Павлов, П.Г. Бобылев // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13. № 10. С. 434–441.
 17. **Gradient** heatmetry in the study of boiling on spherical surface / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, A.V. Pavlov, P.G. Bobylev, M.D. Vinogradov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 1867. P. 012015.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1867/1/012015>
 18. **The study** of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, A.Yu. Babich, E.R. Zainullina // *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. P. 321–323.
 19. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V.** Heatmetry: The science and practice of heat flux measurement. St.-Petersburg: Springer, 2020.
 20. **Митяков В.Ю., Павлов А.В., Бобылев П.Г.** Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель // 29-я Всерос. конф. Неделя науки СПбПУ. Санкт-Петербург, Россия. 18–23 ноября 2019 г. СПб.: Политехпресс, 2020.
 21. **Nukiyama S.** The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1984. V. 27. No. 7. P. 959–970.
 22. **Decrease** of Leidenfrost temperature at quenching in subcooled liquids / A.R. Zabiroy, V.V. Yagov, V.A., Ryazantsev, I.A. Molotova, M.M. Vinogradov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2116. P. 012010.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2116/1/012010>
 23. **Bang I.C., Chang S.H.** Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nano-fluids from a plain surface in a pool // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2005. V. 48. Is. 12. P. 2407–2419.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047>

Gradient Thermometry in the Study of Heat Transfer during Boiling in a Large Volume of Uncooled Water and Liquid with the Addition of Al_2O_3 Microparticles

A. V. Pavlov^{a, *}, P. G. Bobylev^a, and S. Z. Sapozhnikov^a

^a Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

*e-mail: pavlovav196@mail.ru

Abstract—Heat transfer during boiling in a large volume of subcooled pure water and water with the addition of Al_2O_3 microparticles is considered. The presented brief literature review indicates a clearly insufficient experimental base, without which it is impossible to talk about a direct dependence of the critical heat-flux density on the concentration of particles in a liquid. The methods used in the considered publications for studying heat transfer during boiling do not give a complete picture of the entire process and do not allow one to draw unambiguous conclusions. In the present work, the main research method was gradient thermal logging. The applied heterogeneous gradient heat-flux sensors made it possible to directly obtain local values of the heat-flux density (HTF) and proved to be a reliable tool in the study of phase transitions in a nonstationary formulation of the problem. The article considers three temperature differences, 384, 391, and 400°C, selected based on the resource of the model (time of uninterrupted operation of the model and primary converters) and in view of the stable film boiling mode characteristic of the critical values of the PTP. In the entire studied range of mass concentrations of Al_2O_3 microparticles from 1 to 4%, an intensification of heat transfer was observed during boiling of subcooled water at atmospheric pressure. The critical PTP for the considered temperature differences turned out to be 3.6–5.1 times higher than for pure water. For each temperature regime, the optimal concentrations of Al_2O_3 microparticles (particles) corresponding to the maximum PTP were revealed. An increase in the critical temperature in all modes and, as a consequence, in the local PHF is presumably due to a change in the thermophysical properties of the suspension and the perturbations introduced by these particles into the boiling process.

Keywords: gradient heatmetry, heterogeneous gradient heat-flux sensors, local heat-flux density, critical temperature, Al_2O_3 microparticles