

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 495–503  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 495–503

Научная статья  
УДК 536.24

## Исследование теплообмена при кипении недогретой воды с добавлением микро- и наночастиц

П.Г. Бобылев<sup>1</sup>✉, А.В. Павлов<sup>1</sup>, Н.Е. Кикоть<sup>1</sup>, А.В. Бикмулин<sup>1</sup>, С.З. Сапожников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
✉pavel\_b.g.97@mail.ru

**Аннотация.** Исследовано кипение недогретой воды с добавлением микро- и наночастиц  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ . Методом градиентной теплотрии получены зависимости местной плотности теплового потока на поверхности теплообмена от времени. При рассмотрении интенсификации теплообмена при кипении недогретой жидкости на перегретой поверхности в большом объеме основным критерием является максимальная плотность теплового потока. Этот параметр напрямую зависит от времени существования переходного и пленочного режимов. Получены зависимости плотности теплового потока от недогрева взвеси, концентрации частиц, их размера и материала. Градиентная теплотрия перспективна при изучении фазовых переходов и нестационарных процессов, поскольку позволяет напрямую определять местную плотность теплового потока.

**Ключевые слова:** градиентная теплотрия, гетерогенные градиентные датчики теплового потока, местная плотность теплового потока, временная теплограмма, максимальная плотность теплового потока, микро- и наночастицы  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-29-00160.

**Для цитирования.** Бобылев П.Г., Павлов А.В., Кикоть Н.Е., Бикмулин А.В., Сапожников С.З. Исследование теплообмена при кипении недогретой воды с добавлением микро- и наночастиц // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 495–503. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177595>

Original article

## The study of heat transfer during boiling subcooled water with micro- and nanoparticles adding

P.G. Bobylev<sup>1</sup>✉, A.V. Pavlov<sup>1</sup>, N.E. Kikot<sup>1</sup>, A.V. Bikmulin<sup>1</sup>, S.Z. Sapozhnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia  
✉pavel\_b.g.97@mail.ru

**Abstract.** The boiling of subcooled water with addition of the  $Al_2O_3$  and  $TiO_2$  micro- and nanoparticles has been studied. The dependencies of the local heat flux density at the heat exchange surface on time were obtained by the gradient heat-metering method. When considering the heat exchange intensification while subcooled liquid boiling on the overheated surface in a large volume, the main criterion is maximum heat flux density. This parameter is directly dependent on both transient and film modes. The dependences of the

maximum heat flux density on the suspension subcooling, particles concentration, their size and material were obtained. Gradient heat metering is rather prospective while studying phase transitions and non-stationary processes as long as it allows direct determining of the local heat flux density.

**Keywords:** gradient heat metering, heterogeneous gradient heat flux sensors, heat flux per unit area, temporal thermogram, maximum heat flux density, micro- and nanoparticles  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$

**Funding.** The work was financed by the RSF Grant No 22-29-00160.

**For citation.** Bobylev P.G., Pavlov A.V., Kikot N.E., Bikmulin A.V., Sapozhnikov S.Z. The study of heat transfer during boiling subcooled water with micro- and nanoparticles adding. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 495–503. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177595>

## Введение

Изучение теплообмена при кипении является одной из наиболее динамично развивающихся областей исследования. Менее чем за 100 лет набрана значительная база данных, собранная зарубежными и отечественными исследователями [1, 2]. Полученные эмпирические зависимости описывают теплообмен для большинства теплофизических параметров теплоносителя и различной формы поверхности [3]. Однако ввиду хаотичности кипения отсутствует универсальная математическая модель, позволяющая рассчитать плотности теплового потока и коэффициент теплоотдачи. Поисковые работы, нацеленные на создание такой модели, рассматривают отдельные центры парообразования или паровой пузырь в микрослое жидкости [4, 5]. Однако разрабатываемые модели имеют большое количество ограничений и недоработок, что сильно затрудняет их применение. Гораздо ближе к изучению реальных процессов — исследования теплообмена при кипении жидкости в большом объеме.

На сегодняшний день есть два основных подхода к изучению теплообмена при кипении жидкости в большом объеме (использование наножидкостей в качестве теплоносителя не исключение).

Первый подход направлен на изучение докритических параметров теплообмена при кипении в стационарном режиме [6, 7, 8].

Второй подход направлен на изучение теплообмена при кипении в нестационарном режиме, когда перегретую модель помещают в насыщенную или недогретую жидкость [9, 10].

Оба подхода применяются для изучения кипения на поверхностях разнообразной формы и с использованием различных рабочих жидкостей, применяемых в реальных процессах [11, 12, 13].

Особое место в изучении теплообмена при кипении занимают вопросы интенсификации. С развитием технологий встает вопрос: как наиболее

эффективно отводить тепловые потоки высокой плотности?

Существует три основных способа интенсификации теплообмена при кипении:

- воздействие на внутренние механизмы процесса;
- увеличение площади теплообмена;
- создание условий для интенсивного отвода паровой фазы от поверхности теплообмена [14].

Эффективна комбинация нескольких способов. Однако не все они изучены в полной мере и доказали свою эффективность.

Эффект от добавления оксидов металлов к базовой жидкости исследуется давно. Ежегодно растет количество работ, посвященных теплообмену при кипении наножидкостей.

До настоящего времени получен неоднозначный результат от добавки наночастиц к базовой жидкости. За последние 20 лет написан ряд обзорных статей по данной теме [15, 16, 17]. В них собраны и проанализированы экспериментальные данные и выдвинуты гипотезы о механизмах, влияющих на улучшение или ухудшение теплообмена при кипении наножидкостей.

В обзорной работе [18] отмечена противоречивость результатов от добавления наночастиц к базовой жидкости. Только в 55% исследований говорится об увеличении плотности теплового потока (ПТП) и коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении с добавлением наночастиц. В остальных 45% либо наблюдается ухудшение (37%) либо однозначного результата нет.

Поскольку при добавлении твердых частиц к базовой жидкости меняются теплофизические параметры теплоносителя, механизмы, вносящие наибольший вклад в интенсификацию, до сих пор не определены. Авторы работы [16] предполагают, что добавка наночастиц может как интенсифицировать, так и ухудшать теплообмен, поскольку происходит осаждение наночастиц на теплооб-

менную поверхность, изменяется шероховатость, смачиваемость и капиллярные эффекты в микро-слое жидкости.

M.S. Kamel и F. Lezsovits [15] предполагают, что в процессе теплообмена при кипении наножидкости важную роль играют два основных фактора: изменение теплофизических свойств наножидкости и модификация поверхности за счет налипания частиц. Во всех рассмотренных авторами работах отмечается увеличение критической ПТП.

Основными параметрами, влияющими на теплообмен, по мнению авторов [17] являются:

- типы наночастиц и их концентрация;
- свойства поверхности (смачиваемость и шероховатость);
- теплофизические свойства наножидкости, (теплопроводность, плотность, вязкость, поверхностное натяжение);
- условия эксплуатации (интенсивность тепловыделений).

Налипание частиц может как интенсифицировать теплообмен, увеличив площадь теплообмена, так и ухудшить его, выступив в роли теплоизоляции.

Все приведенные выше работы свидетельствуют о том, что однозначного ответа о влиянии наножидкостей на теплообмен при кипении нет. При этом сложно провести качественный эксперимент, который поставит точку в данном вопросе. В большинстве экспериментальных работ, посвященных теплообмену при кипении наножидкостей, применяют термометрию. Этот метод не дает представления о местных ПТП и КТО, а интегральные значения не всегда отражают реальный процесс.

Такой подход, основанный на термометрии, имеет неустранимый недостаток. Удастся оценить только средний ПТП по поверхности теплообмена со всеми ограничениями, накладываемыми решением обратной задачи теплопроводности.

На протяжении последних 25 лет в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого ведутся работы по исследованию теплообмена с применением градиентной теплометрии. Метод нашел широкое применение в фундаментальных и прикладных задачах, позволяя измерять местную ПТП. Изучался теплообмен при обтекании воздухом гладких и ребренных цилиндров [19], конденсации водяного пара [20], факельном сжигании жидкого и газообразного топлива [21] и в других задачах.

Градиентная теплометрия успешно применена в изучении теплообмена при кипении в большом объеме [22, 23]. Совмещение градиентной тепло-

метрии, термометрии и высокоскоростной визуализации при кипении в чистой воде позволило сопоставить местную ПТП, температуру на поверхности модели и гидродинамику процесса. Комплексный подход позволил определить границы режимов кипения [22]. Дальнейшее развитие связано с изучением теплообмена при кипении воды с добавлением микрочастиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) размером 1 мкм и массовой концентрацией 0,32–4% [23]. Определены оптимальные массовые концентрации частиц для разных температурных режимов, при которых эффект максимален (рис. 1).

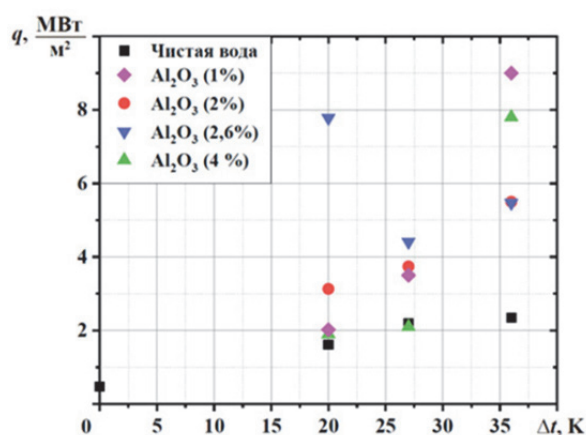


Рис. 1. Зависимость максимальной ПТП от недогрева жидкости при различных концентрациях частиц  $Al_2O_3$ , %: 1 — 0 (чистая вода), 2 — 1,0, 3 — 2,0, 4 — 2,6, 5 — 4,0 [23]

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что используемые в современном эксперименте методы исследования теплообмена при кипении недостаточно информативны. Имеющиеся в распоряжении исследователей термометрия [8, 10] и высокоскоростная визуализация [11, 24] ограничены в получении данных о теплообмене при кипении. Поэтому градиентная теплометрия как способ измерения местной плотности теплового потока, дополненная данными термометрии, дает возможность расширить и уточнить полученные ранее результаты. В работе рассмотрено влияние размера и материала частиц ( $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ ) на теплообмен при кипении. В качестве базовой жидкости использовалась вода.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Исследуемая модель помещается в проходную печь и фиксируется в ней державкой. Сигналы ГГДТП и термопар записываются на измеритель-

но-вычислительный комплекс модели NIPXI-1050 с частотой записи 5000 изм./с. При достижении необходимой температуры модели державка высвобождается, и образец опускается в резервуар объемом 10 л. Температура воды поддерживается омическим нагревателем и отслеживается мультиметром Fluke 289 с термопарой ТХК.

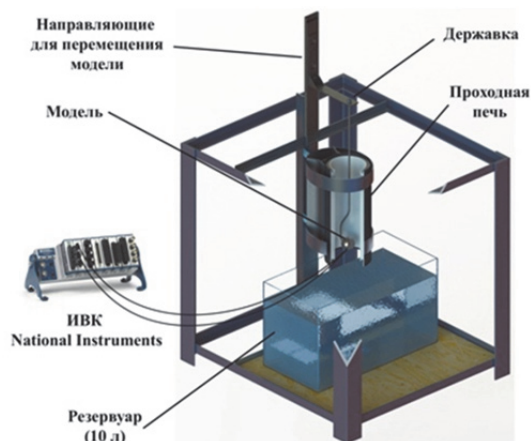


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

### Экспериментальная модель

Экспериментальная модель — цилиндр диаметром 34 мм и высотой 22 мм из титана ВТ22. ГГДТП размерами 3,0 × 3,0 × 0,3 мм установлен заподлицо с торцевой поверхностью модели в выборке размерами 5,0 × 5,0 × 0,5 мм, на дне которой имеются два отверстия диаметром 1,5 мм для вывода проводов.

Для измерения местной ПТП при кипении необходимо измерять температуру поверхности модели, а также контролировать равномерность ее предварительного прогрева. В модели расположены спаи двух термопар: в центре цилиндра и на поверхности, вблизи ГГДТП.

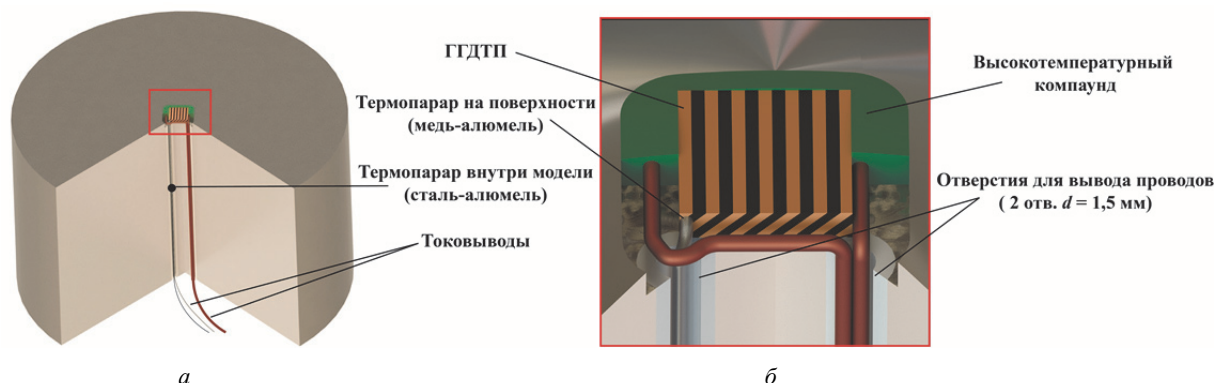


Рис. 3. Экспериментальная модель с ГГДТП: а — общий вид модели с разрезом, б — выборка с ГГДТП

Датчик закреплен в выборке с помощью высокотемпературного компаунда. Для электрической изоляции ГГДТП от поверхности модели использовалась слюда. Тепловой контакт ГГДТП с подложкой обеспечила термопаста (рис. 4). Для работы необходимо подбирать материалы с близкой к титану теплопроводностью, чтобы не было искажений в поле температуры. Теплопроводности титана ВТ 22 [ $\lambda = 9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ] и термопасты [ $\lambda = 11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ] сопоставимы. На рис. 3 представлена модель с ГГДТП и термопарами. Тепловизионная съемка зачерненной нагретой модели с установленным ГГДТП не выявила неравномерности в поле температуры.

Провода к ГГДТП крепились с помощью точечной лазерной сварки. На рис. 4 показана модель после термической обработки компаунда и шлифовки.

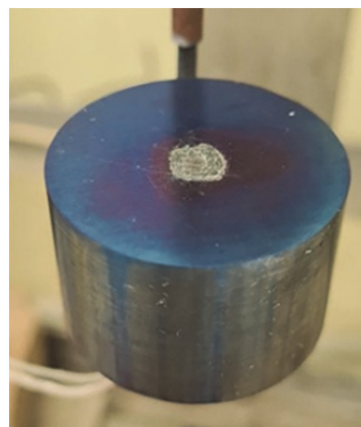
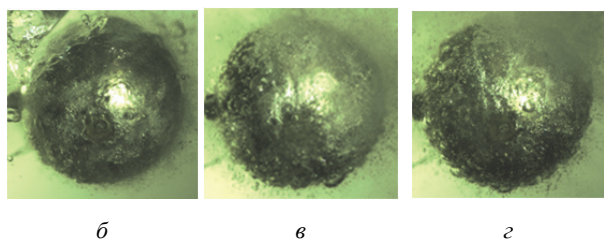
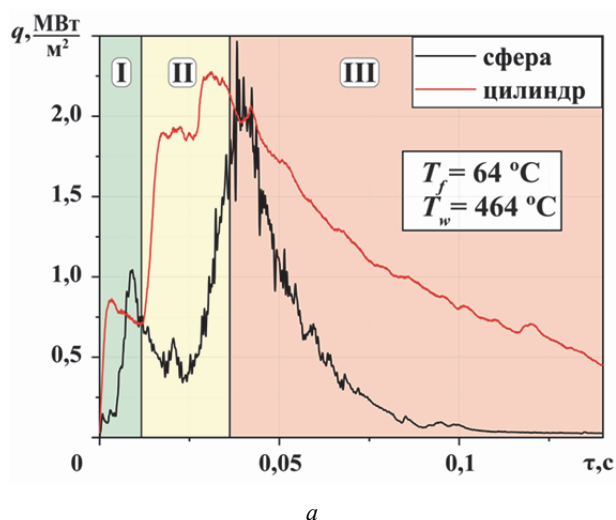


Рис. 4. Фотография экспериментальной модели

В предыдущих работах [22, 23] эксперименты проводились на шаре из титана ВТ 22, но так как шар не имеет прикладного значения, принято решение перейти на более практичную модель.

На первом этапе выбрана цилиндрическая модель с полной теплоемкостью равной теплоемкости шара.

На рис. 5 представлена временная теплограмма остывания цилиндра и сферы при начальной температуре модели  $t_w = 464^\circ\text{C}$  и температуре воды  $t_f = 64^\circ\text{C}$ , а также фотография трех основных режимов кипения, полученных при остывании титановой сферы [23].



**Рис. 5.** Определение режимов кипения: *a* — временная теплограмма сравнения местной ПТП при кипении воды вблизи моделей цилиндра и сферы ( $t_w = 464^\circ\text{C}$ ;  $t_f = 64^\circ\text{C}$ ), *б* — пленочный режим кипения, *в* — переходный режим кипения, *г* — пузырьковый режим кипения

Видно, что режимы кипения: **I** — пленочный (рис. 5, *б*), **II** — переходный (рис. 5, *в*), **III** — пузырьковый (рис. 5, *г*), определенные ранее с помощью совмещения градиентной теплотрии и высокоскоростной визуализации [22], для обеих моделей сохраняются (рис. 5, *a*), но ввиду присутствия концевых эффектов у цилиндра пленочный и переходный режимы кипения имеют некоторые различия. Значения ПТП при переходе к развитому пузырьковому режиму для обеих моделей близки. Повторные эксперименты с микрожидкостью дали аналогичный результат. Это дает основания полагать, что использование ГДТП в исследовании

теплообмена при кипении возможно на поверхностях различной формы.

### Методика эксперимента

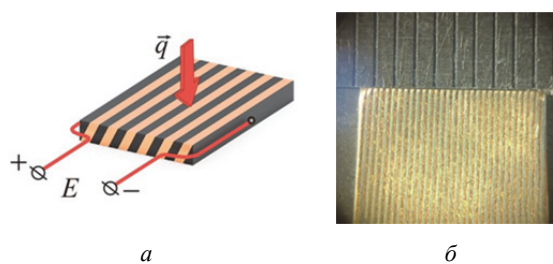
Градиентная теплотрия основана на использовании градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоЭДС. В анизотропной среде, через которую проходит тепловой поток (рис. 6, *a*), появляется поперечная составляющая его вектора. Формула связи термоЭДС с плотностью теплового потока имеет вид

$$q = \frac{E}{A \cdot S_0},$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $E$  — термоЭДС, мВ;  $A$  — площадь «верхней» поверхности ГДТП, м<sup>2</sup>;  $S_0$  — вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт.

Главной особенностью ГДТП является их anomalно низкая постоянная времени ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с), из-за которой градиентная теплотрия практически безынерционна [25].

На основе композиции из металлических компонентов созданы гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП), термостойкость которых превышает 1500 К [26]. Эта модификация (рис. 6, *б*) использовалась в данной работе.



**Рис. 6.** Градиентные гетерогенные датчики теплового потока (ГГДТП): *a* — схема действия, *б* — фотография ГГДТП

Градуировка ГГДТП проводилась на стенде [27] и уточнялась по месту монтажа. Относительная расширенная неопределенность градуировки не превышает 4%.

В отличие от ГДТП на основе висмута вольт-ваттная чувствительность ГГДТП на основе композиции металлических компонентов (Cu+Ni) зависит от температуры датчика. По результатам градуировки была получена вольт-ваттная зависимость ГГДТП из меди и никеля от температуры:

$$S_0 = 4,7806 \cdot e^{-0,011 \cdot t_{ГДТП}}$$

где  $t_{ГДТП}$  — температура ГДТП, °C;  $S_0$  — вольтватная чувствительность ГДТП, мВ/Вт.

### Результаты эксперимента

В работе представлены результаты экспериментов при кипении недогретой воды с добавлением микро- и наночастиц  $Al_2O_3$  и наночастиц  $TiO_2$  при атмосферном давлении. Рассматривались три температурных режима при начальной температуре поверхности цилиндра  $t_w = 464^\circ C$  и при температуре воды  $t_f = 64^\circ C$ ,  $t_w = 464^\circ C$  и  $t_f = 73^\circ C$ ,  $t_w = 464^\circ C$  и  $t_f = 80^\circ C$ . Массовые концентрации частиц  $\omega = 0,32; 0,5$ .

Рассмотрим эксперимент при режимах, представленных на рис. 5. Эксперименты с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  (1 мкм, 0,32% массовых) демонстрируют интенсификацию теплообмена. Возросло значение ПТП при переходе к пузырьковому режиму, и уменьшилось время остывания модели (рис. 7). Данные термометрии согласуются с данными, полученными градиентной теплометрии (рис. 8).

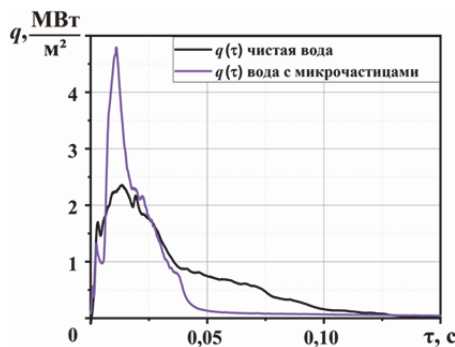


Рис. 7. Временная теплограмма сравнения ПТП при кипении в чистой воде и в воде с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  (1 мкм, 0,32% массовых)

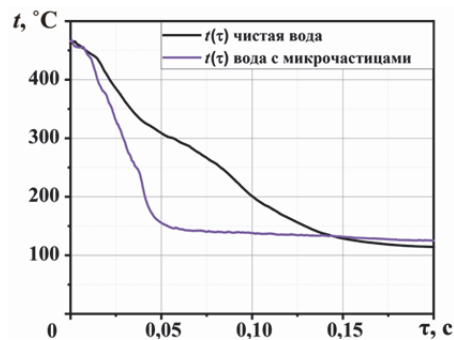


Рис. 8. Временная термограмма сравнения температуры поверхности модели при кипении в чистой воде и в воде с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  (1 мкм, 0,32% массовых)

Взвесь наночастиц  $Al_2O_3$  (54 нм, 0,32%) демонстрирует обратный результат: обнаружено снижение ПТП при переходе в пузырьковый режим и увеличение времени процесса (рис. 9). Зависимость температуры от времени представлена на рис. 10.

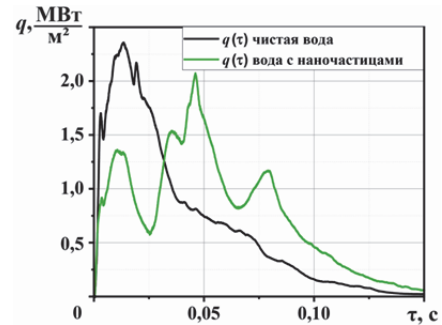


Рис. 9. Временная теплограмма сравнения ПТП при кипении в чистой воде и в воде с добавлением наночастиц  $Al_2O_3$  (54 нм, 0,32% массовых)

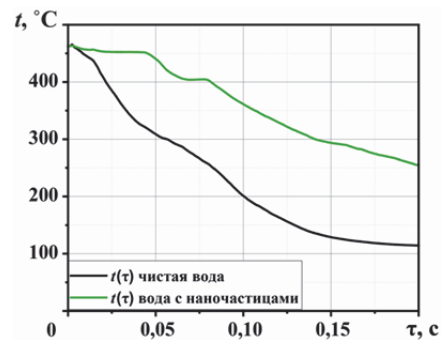


Рис. 10. Временная термограмма сравнения температуры поверхности модели при кипении в чистой воде и в воде с добавлением наночастиц  $Al_2O_3$  (54 нм, 0,32% массовых)

Взвесь наночастиц  $TiO_2$  (54 нм 0,32%) продемонстрировала результат, аналогичный взвеси  $Al_2O_3$ . Обнаружено снижение ПТП при переходе в пузырьковый режим и увеличение времени процесса (рис. 11). Зависимость температуры от времени представлена на рис. 12.

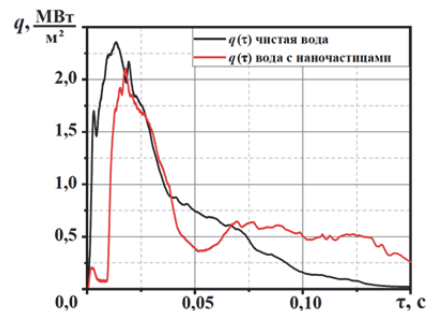


Рис. 11. Временная теплограмма сравнения ПТП при кипении в чистой воде и в воде с добавлением наночастиц  $TiO_2$  (54 нм, 0,32% массовых)

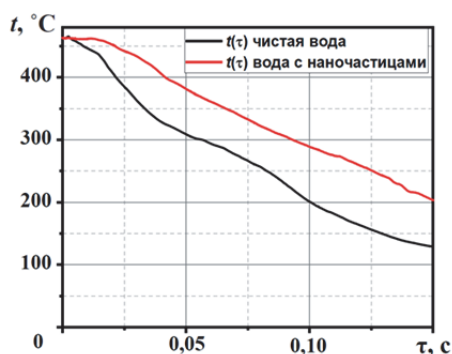


Рис. 12. Временная термограмма сравнения температуры поверхности модели при кипении в чистой воде и в воде с добавлением наночастиц  $\text{TiO}_2$  (54 нм, 0,32% массовых)

Особенность эксперимента со взвесями заключается в том, что после каждого эксперимента модель необходимо очищать от осевших частиц, чтобы при погружении модели взвесь контактировала с чистой поверхностью.

В рассмотренной постановке эксперимента определяющим интенсификационным параметром является местная ПТП в начале пузырькового режима. Она напрямую связана со временем существования паровой пленки и переходного режима. На рис. 13 представлена зависимость местной ПТП от концентрации, недогрева, размера и материала частиц.

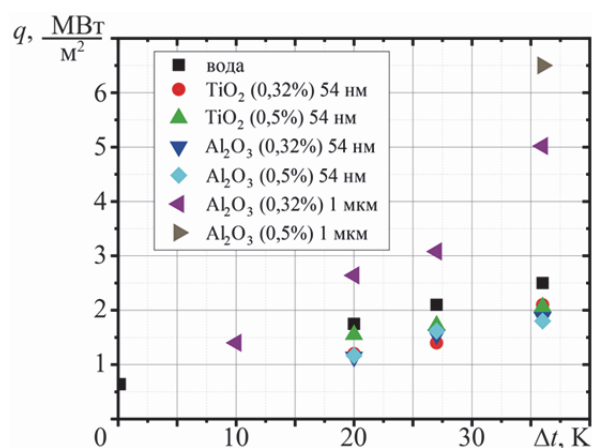


Рис. 13. Зависимость максимальной ПТП от недогрева жидкости, концентрации, материала и размера частиц

### Выводы

1. При кипении взвеси частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с размером 1 мкм и массовой концентрацией 0,32 и 0,5% наблюдается интенсификация теплообмена. Предполагается, что частицы такого размера при осаждении на поверхности формируют «развитую» поверхность теплообмена, что сокращает время

существования паровой пленки и приводит к раннему контакту перегретой поверхности с водой.

2. Частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$  с размером 54 нм и массовой концентрацией 0,32 и 0,5% снижают максимальную ПТП. Осаждение частиц такого размера формирует слой теплоизоляции, который снижает теплоотвод от поверхности.

3. Обнаружено, что слой, сформированный микро- и наночастицами, нестабилен и при извлечении модели из резервуара разрушается. Эксперимент с кипением капли воды со взвесью частиц на перегретой поверхности подтвердил этот факт, а также равномерность оседания частиц как на ГГДТП, так и на свободной поверхности модели.

4. Применение твердых частиц как интенсификатора теплообмена при кипении оправдано только в аварийных случаях, когда экстренно необходимо охладить перегретую поверхность. Применение такого метода в номинальном режиме работы энергетического оборудования требует дополнительных исследований.

### Список источников

1. Bromley Z. Heat transfer in stable film boiling // Chemical Engineering Progress. 1952. Vol. 56. № 5. P. 221–227.
2. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. Москва: Издательство «МЭИ», 2000. 388 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва: «Энергия», 1977. 344 с.
4. Zaboli S., Alimoradi H., Shams M. Numerical investigation on improvement in pool boiling heat transfer characteristics using different nanofluid concentrations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. № 147 (6). P. 10659–10676. DOI: 10.1007/s10973-022-11272-0. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10973-022-11272-0.pdf>
5. Georgoulas A., Marengo M. Numerical Simulation of Pool Boiling: The Effects of Initial Thermal Boundary Layer, Contact Angle and Wall Superheat // 14th UK Heat Transfer Conference, Edinburgh, United Kingdom, 2015. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/188255378.pdf>
6. Vladimirov V.Yu., Chinov E.A. Heat transfer enhancement when boiling on finned surfaces // APTPH XVI 2020, Journal of Physics: Conference Series, 2021. Vol. 1867. DOI: 10.1088/1742-6596/1867/1/012024
7. Khooshehchin M., Mohammadidoust A., Fathi S. Experimental Investigation of Stabilizers of Nanofluid in the Pool Boiling Process // Heat Transfer Engineering, 2023. Vol. 44 (5). P. 442–460.
8. Reddy Y.A., Venkatachalapathy S. Heat Transfer Enhancement Studies in Pool Boiling using Hybrid Nanofluids // Thermochimica Acta. 2018. Vol. 672. P. 93–100.

9. Lotfi H., Shafii M.B. Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid // *International Journal of Thermal Sciences*. 2009. Vol. 48. P. 2215–2220.
10. Ягов В.В., Забиров А.Р., Лексин М.А. Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // *Теплоэнергетика*. 2015. № 11. С. 70–80.
11. Venkitesh V., Dash S. Enhancement of quenching heat transfer performance through destabilization of vapor film // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. Vol. 204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123851>
12. Pavlenko A.N., Zhukov V.I. Symmetry of structures under two-dimensional instability in a finite-height horizontal layer of boiling liquid // *Symmetry*. 2023. Vol. 15. № 9. URL: <https://doi.org/10.3390/sym15091792>
13. Li Q., Zhang Z. Z., Gao X. Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer for R22, R407c, and R410a on a Horizontal Tube Bundle With Enhanced Tubes // *Heat Transfer Engineering*. 2011. Vol. 32. P. 943–948. DOI: 10.1080/01457632.2011.556369
14. Dedov A.V. A Review of Modern Methods for Enhancing Nucleate Boiling Heat Transfer // *Thermal Engineering*. 2019. Vol. 66. No. 12. P. 881–915.
15. Kamel M.S., Lezsovits F., Hussein A.K. Experimental studies of flow boiling heat transfer by using nanofluids // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 138. P. 4019–4043.
16. Fang X., Wang R., Chen W., Zhang H., Ma C. A review of flow boiling heat transfer of nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 91. P. 1003–1017.
17. Pinto R.V., Fiorelli F.A.S. Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 108. P. 720–739.
18. Mukherjee S., Ebrahim S., Purna C.M., Naser A., Chaudhur P. A review on pool and flow boiling enhancement using nanofluids: nuclear reactor application // *Processes*. 2022. Vol. 10. Iss. 1. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/1/177>
19. Гусаков А.А., Греков М.А., Сероштанов В.В. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. № 2. С. 151–164. DOI: 10.18721/JPM.11214
20. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Зайнуллина Э.Р., Бабич А.Ю. Изучение пленочной конденсации насыщенного водяного пара на поверхностях труб методом градиентной теплотометрии // *Теплоэнергетика*. 2021. № 10. С. 73–81. DOI: 10.1134/S0040363621090071
21. Bobylev P.G., Pavlov A.V., Proskurin V.M., Andreyev Y.V., Mityakov V.Y., Sapozhnikov S.Z. Gradient Heatmetry in a Burners Adjustment // *Inventions*. 2022. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7040122>
22. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Гусаков А.А., Павлов А.В., Бобылев П.Г. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплотометрии // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13. № 10. С. 434–441. DOI: 10.34759/trt-2021-13-10-434-441
23. Павлов А.В., Бобылев П.Г., Сапожников С.З. Градиентная теплотометрия в исследовании теплообмена при кипении в большом объеме недогретой воды и жидкости с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  // *Теплоэнергетика*. 2023. № 3. С. 40–48.
24. Kouloulis K., Sergis A., Hardalupas Y., Barrett T.R. Visualisation of subcooled pool boiling in nanofluids // *Fusion Engineering and Design*. 2018. Vol. 146. P. 153–165. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.005
25. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Babich A.Yu., Zainullina E.R. The study of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces // *Technical Physics Letters*. 2019. Vol. 45. P. 321–323.
26. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V. Heatmetry: The science and practice of heat flux measurement. St.-Petersburg: Springer, 2020. 209 p.
27. Митяков В.Ю., Павлов А.В., Бобылев П.Г. Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель // *Международный научный форум «Неделя науки – 2019» (Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 г.)*. Санкт-Петербург: Политехпресс, 2020. С. 164–166.

#### References

1. Bromley Z. Heat transfer in stable film boiling. *Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 56, no. 5, pp. 221–227.
2. Labuntsov D.A. Physical foundations of energy. Selected works on heat transfer, hydrodynamics, thermodynamics. Moscow: Izdatel'stvo «MPEI», 2000, 388 p.
3. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energy, 1977, 344 p.
4. Zaboli S., Alimoradi H., Shams M. Numerical investigation on improvement in pool boiling heat transfer characteristics using different nanofluid concentrations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022, no. 147 (6), pp. 10659–10676. DOI: 10.1007/s10973-022-11272-0
5. Georgoulas A., Marengo M. Numerical Simulation of Pool Boiling: The Effects of Initial Thermal Boundary Layer, Contact Angle and Wall Superheat. *14th UK Heat Transfer Conference*, Edinburgh, United Kingdom, 2015. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/188255378.pdf>
6. Vladimirov V.Yu., Chinov E.A. Heat transfer enhancement when boiling on finned surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1867 (APTPI XVI 2020), 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1867/1/012024
7. Khooshehchin M., Mohammadidoust A., Fathi S. Experimental Investigation of Stabilizers of Nanofluid in the Pool Boiling Process. *Heat Transfer Engineering*, 2023, vol. 44 (5), pp. 442–460.



8. **Reddy Y.A., Venkatachalapathy S.** Heat Transfer Enhancement Studies in Pool Boiling using Hybrid Nanofluids. *Thermochimica Acta*, 2018, vol. 672, pp. 93–100.
9. **Lotfi H., Shafii M.B.** Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, vol. 48, pp. 2215–2220.
10. **Yagov V.V., Zabirov A.R., Leksin M.A.** Unsteady heat transfer during film boiling of a subcooled liquid. *Теплоэнергетика*, 2015, no. 11, pp. 70–80.
11. **Venkitesh V., Dash S.** Enhancement of quenching heat transfer performance through destabilization of vapor film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123851>
12. **Pavlenko A.N., Zhukov V.I.** Symmetry of structures under two-dimensional instability in a finite-height horizontal layer of boiling liquid. *Symmetry*, 2023, vol. 15, no. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/sym15091792>
13. **Li Q., Zhang Z. Z., Gao X.** Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer for R22, R407c, and R410a on a Horizontal Tube Bundle With Enhanced Tubes. *Heat Transfer Engineering*, 2011, vol. 32, pp. 943–948. DOI: 10.1080/01457632.2011.556369
14. **Dedov A.V.** A Review of Modern Methods for Enhancing Nucleate Boiling Heat Transfer. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 12, pp. 881–915.
15. **Kamel M.S., Lezsovits F., Hussein A.K.** Experimental studies of flow boiling heat transfer by using nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, vol. 138, pp. 4019–4043.
16. **Fang X., Wang R., Chen W., Zhang H., Ma C.** A review of flow boiling heat transfer of nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 91, pp. 1003–1017.
17. **Pinto R.V., Fiorelli F.A.S.** Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 720–739.
18. **Mukherjee S., Ebrahim S., Purna C.M., Naser A., Chaudhur P.** A review on pool and flow boiling enhancement using nanofluids: nuclear reactor application. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 1. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/1/177>
19. **Gusakov A.A., Grekov M.A., Seroshtanov V.V.** Aerodynamics and heat transfer on the surface of a single annular fin. *St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Physical and mathematical sciences*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 151–164. DOI: 10.18721/JPM.11214
20. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Zainullina E.R., Babich A.Yu.** Study of film condensation of saturated water vapor on pipe surfaces by the method of gradient heat metering. *Thermal Engineering*, 2021, no. 10, pp. 73–81. DOI: 10.1134/S0040363621090071
21. **Bobylev P.G., Pavlov A.V., Proskurin V.M., Andreyev Y.V., Mityakov V.Y., Sapozhnikov S.Z.** Gradient Heatmetry in a Burners Adjustment. *Inventions*, 2022, vol. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7040122>
22. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Gusakov A.A., Pavlov A.V., Bobylev P.G.** Studying boiling on the sphere surface by gradient heat-metering method. *Thermal processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 10, pp. 434–441. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-10-434-441
23. **Pavlov A.V., Bobylev P.G., Sapozhnikov S.Z.** Gradient heatmetry in the study of heat transfer during boiling in a large volume of subcooled water and liquid with the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microparticles. *Thermal Engineering*, 2023, no. 3, pp. 40–48.
24. **Kouloulis K., Sergis A., Hardalupas Y., Barrett T.R.** Visualisation of subcooled pool boiling in nanofluids. *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 146, pp. 153–165. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.12.005
25. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Babich A.Yu., Zainullina E.R.** The study of heat flux measurement for heat transfer during condensation at pipe surfaces. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, pp. 321–323.
26. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V.** Heatmetry: The science and practice of heat flux measurement. St.-Petersburg: Springer, 2020, 209 p.
27. **Mityakov V.Yu., Pavlov A.V., Bobylev P.G.** Sozdanie i graduirovka pervichnykh preobrazovatelei na osnove kompozitsii med'-nikel' [Creation and calibration of primary transducers based on copper-nickel composition]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi forum «Nedelya nauki – 2019» (Sankt-Peterburg, 18–23 noyabrya 2019 god.)*. Sankt-Peterburg: Politekhpress, pp. 164–166.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 07.10.2023; принята к публикации 18.11.2023.

The article was submitted on 10.07.2023; approved after reviewing on 07.10.2023; accepted for publication on 18.11.2023.