

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ КАПЕЛЬНО-РУЧЕЙКОВОЙ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ¹

© 2023 г. Э. Р. Зайнуллина*, В. Ю. Митяков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: zaynullinaelza@gmail.com

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

В изучении теплообмена при конденсации впервые совмещены возможности визуализации течения и градиентной теплотометрии. Измерена местная плотность теплового потока при капельно-ручейковой конденсации водяного пара на поверхности вертикальной пластины. В режиме капельно-ручейковой конденсации средняя плотность существенно нестационарного теплового потока составила 31.2 кВт/м². Показана физическая картина, обеспечивающая пульсации теплового потока. Результаты эксперимента выявили возможности использования градиентной теплотометрии как средства мониторинга теплообмена при конденсации.

DOI: 10.31857/S0040364423040178

ВВЕДЕНИЕ

Термометрия широко применяется для оценки плотности теплового потока и коэффициентов теплоотдачи (КТО) при конденсации [1–4]. Достоинствами метода являются простота и доступность первичных преобразователей, однако их монтаж загромождает поверхность теплообмена и искажает течение конденсата. Интегральные измерения, когда температура теплоносителей определяется на входе и выходе из измерительного участка, позволяют определить лишь средние значения КТО [5]. К непреодолимым недостаткам метода относятся инерционность существующих первичных преобразователей и высокая (10–20%) неопределенность оценки КТО.

Альтернативой являются эксперименты, выполненные с применением оптических методов [6, 7], предусматривающих измерение толщины конденсатной пленки. Однако такой подход применим исключительно для оптически прозрачных сред, а экспериментальные установки сложны и обеспечивают только косвенное определение КТО.

Предыдущие эксперименты [8, 9], выполненные с применением градиентной теплотометрии, подтвердили применимость метода для изучения теплообмена при конденсации. В результате экспериментов на вертикальной трубе построены зависимости плотности теплового потока от времени (временные теплограммы). Выявлена существенная нестационарность теплообмена при конденсации: пульсации плотности теплового потока дости-

гали 20%. Авторы работ [8, 9] объясняли наличие пульсаций волнообразованием на поверхности пленки и турбулизацией течения, но их предположения основывались исключительно на показаниях градиентного датчика теплового потока (ГДТП) и не были подтверждены визуально.

В зависимости от расхода теплоносителей, состояния и ориентации теплообменной поверхности распределение конденсата может быть неравномерным [10–12]: образуются отдельные капли, ручейки, жидкие мостики или сухие участки, что характерно для капельно-ручейковой и пленочно-ручейковой конденсации. Совмещение возможностей визуализации и термометрии позволяет оценить распределение конденсата и местную толщину его пленки, но не местную плотность теплового потока.

Экспериментальные работы [13, 14], в которых возможности градиентной теплотометрии совмещены с оптическими методами, подтвердили высокую информативность нового подхода. Подтверждены связи теплового потока и КТО с характером течения. В настоящей работе предпринята попытка совместить возможности градиентной теплотометрии и визуализации течения при изучении конденсации водяного пара на вертикальной охлаждаемой пластине. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, температура на поверхности теплообмена составляла 60°C.

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ

Градиентная теплотометрия [15] применяется для прямого измерения местной плотности теплового потока: при прохождении теплового потока

¹ По материалам Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-8). Москва. 17–22 октября 2022 г.

через пластинку с анизотропией тепло- и электрофизических свойств возникает термоЭДС, которая пропорциональна сигналу датчика. Плотность теплового потока при этом оценивается по формуле

$$q = \frac{E_{\perp}}{S_0 F},$$

где E_{\perp} – термоЭДС, мВ; S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; F – площадь ГДТП в плане, м².

Градиентная теплотрия основана на применении ГДТП и гетерогенных ГДТП (ГГДТП). ГДТП состоит из последовательно соединенных брусков монокристаллического висмута, который обладает естественной анизотропией тепло- и электрофизических свойств; термостойкость ГДТП не превышает 270°C. ГГДТП представляют собой композицию из разнородных металлов, которая реализует искусственную анизотропию свойств; в условиях настоящих экспериментов они более работоспособны.

Главной особенностью ГДТП и ГГДТП является аномально низкая постоянная времени (10^{-8} – 10^{-9} с), которая позволяет считать их в данных экспериментах практически безынерционными.

Эксперименты выполнены с применением ГГДТП из композиции медь–никель, работоспособность которых подтверждена в исследовании кипения [16]. Градуировка используемого ГГДТП на специальном стенде [17] показала, что его вольт-ваттная чувствительность в диапазоне температур 70–100°C составляет $S_0 \sim 28$ мкВ/Вт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Диск из нержавеющей стали диаметром 150 мм и толщиной 0.75 мм имеет коробчатый контур для подвода и отвода охлаждающей воды. Для расчета средней плотности теплового потока, отведенного к воде, измерены ее объемный расход и темпе-

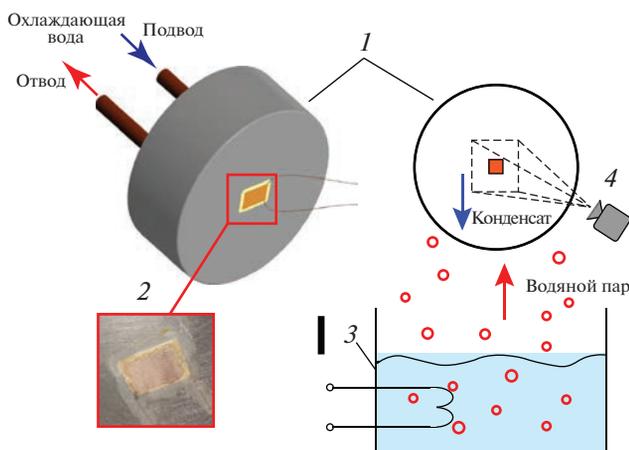


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – модель, 2 – ГГДТП, 3 – парогенератор, 4 – видеокамера.

ратура на входе и выходе из контура. Подвод пара к теплообменной поверхности обеспечивается парогенератором. На стенде отсутствуют стенки, препятствующие рассеиванию пара, поэтому расходы конденсата и пара не измерялись.

В центре теплообменной поверхности установлен ГГДТП из композиции медь–никель размерами $10 \times 15 \times 0.2$ мм³, который подключен по “трехпроводной схеме”: к ГГДТП приварены два медных и один алюмелевый провод. Подключение измерительного прибора к паре проводов медь–медь обеспечивает измерение плотности теплового потока, а к паре медь–алюмель – температуры в зоне установки датчика.

Сигнал ГГДТП регистрирует модернизированный светолучевой осциллограф Н-145. Его ртутная лампа и система зеркал заменены на лазер, а фоточувствительная бумага – на удаленную шкалу. Это исключает вклад электромагнитных помех. Луч лазера, отраженный от зеркала гальванометра, отображается на удаленной шкале, где производится видеорегистрация положения лазерного пятна. Последующая обработка видеозаписей в пакете Track Mate программы Image J [18] позволила отследить положение пятна и, следовательно, уровень сигнала. В результате получены временные теплограммы.

Одновременно с записью сигнала ГГДТП выполнялась видеозапись конденсации на вертикальном диске, раскадровка которой позволила сопоставлять мгновенную плотность теплового потока с движением конденсата.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведена временная теплограмма, полученная при конденсации водяного пара на поверхности вертикального диска. По плотности

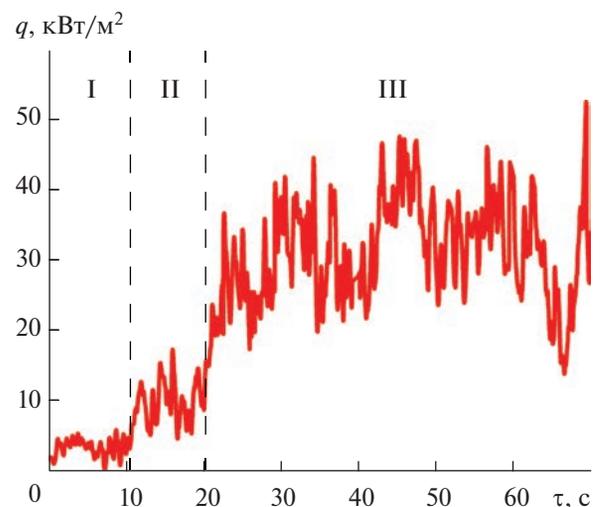


Рис. 2. Временная теплограмма при конденсации на вертикальном диске: I, II, III – этапы конденсации.

теплового потока на кривой можно выделить три этапа: I – $\bar{q} < 7$ кВт/м², II – $\bar{q} = 3–18$ кВт/м², III – $\bar{q} = 15–50$ кВт/м².

На рис. 3 представлены результаты, соответствующие этапу I, для промежутка времени от 0 до 10.5 с. Здесь на поверхности образуются первые капли конденсата (рис. 3б, 3в). Капли смачивают поверхность (краевой угол смачивания $\theta < 90^\circ$, капли имеют несферическую форму), но в единую пленку не объединяются. Средняя плотность теплового потока (рис. 3а) составляет $\bar{q} = 3.2$ кВт/м². Пульсации плотности теплового потока связаны с образованием капель на поверхности ГГДТП.

Наблюдаемое образование капель свойственно капельной конденсации, при которой краевой угол смачивания должен быть больше 90° . В настоящем исследовании краевой угол не измерялся. Полагаясь на данные из справочной литературы [19], укажем, что угол смачивания каплей воды медной поверхности составляет около 46° , каплей воды стальной поверхности – 41° . В экспериментах специальной подготовки для организации капельной конденсации (нанесения гидрофобного покрытия, введения гидрофобизатора в

водяной пар или создания геометрически неоднородной поверхности) не осуществлялось. Организация капельной конденсации на поверхности пластины может быть обусловлена физико-химической неоднородностью поверхности конденсации, так как тщательная очистка и обработка поверхности не производилась. Похожая картина – образование отдельных капель неправильной формы, имеющих меньший, чем при капельной конденсации, краевой угол, – имеет место при поверхностной конденсации бинарных смесей или при избыточном впрыске в пар гидрофобизирующих добавок [20]. Определение причин и условий организации на поверхности пластины капельной конденсации требует дополнительных исследований.

На рис. 4 приведены временная теплограмма и фотографии течения для этапа II – в промежутке времени от 10.5 до 19.7 с. На данном этапе происходит объединение капель, что подтверждается фотографиями (рис. 4б–4г). По мере слияния капель плотность теплового потока увеличивается до уровня $\bar{q} = 9.6$ кВт/м² (рис. 4а). Пульсации плотности теплового потока связаны с объединением конденсатных капель.

В результате обработки данных установлено, что этапы I и II соответствуют образованию конденсата на поверхности пластины. Пульсации плотности теплового потока связаны с образованием капель и их слиянием. Изображение капель

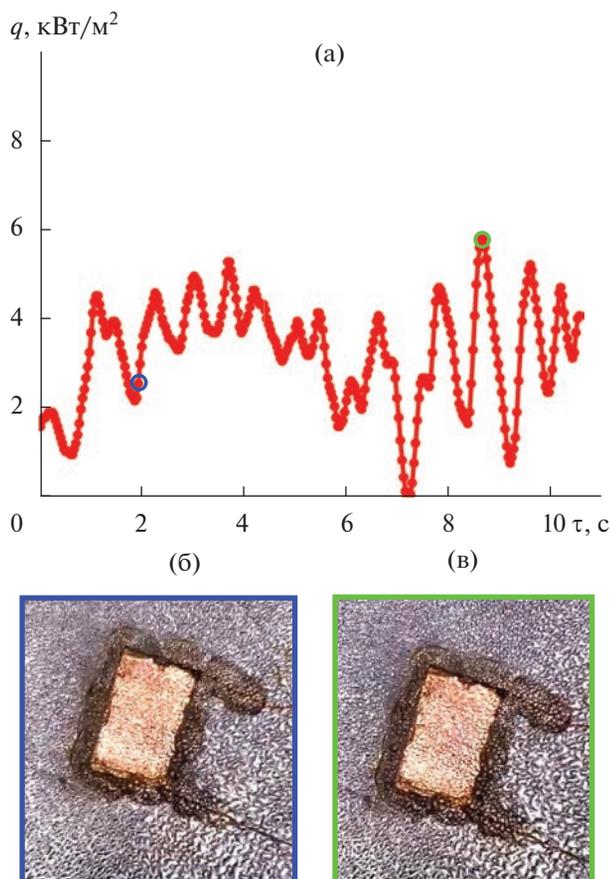


Рис. 3. Временная теплограмма на этапе конденсации I (а) и фотографии течения в моменты времени $\tau = 2$ (б) и 9 с (в).

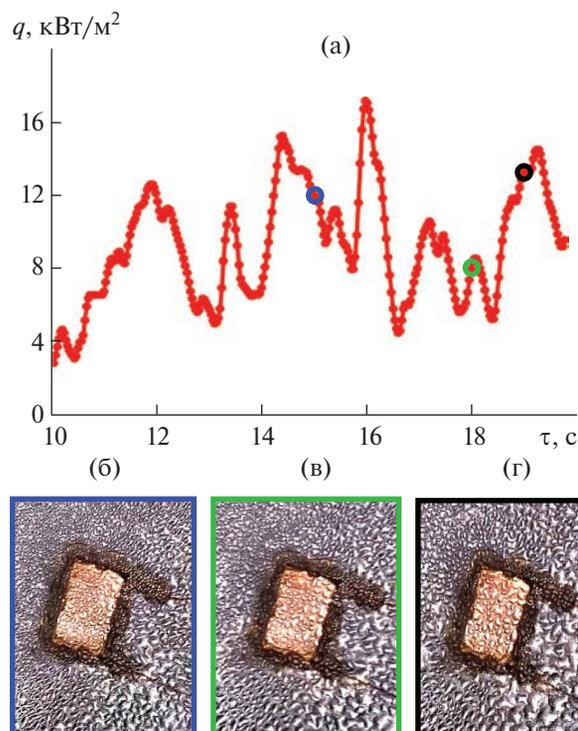


Рис. 4. Временная теплограмма на этапе конденсации II (а) и фотографии течения в моменты времени $\tau = 15$ (б), 18 (в) и 19 с (г).

указывает на смачиваемость поверхности, т.е. режим конденсации – капельно-пленочный.

На рис. 5 представлены результаты, соответствующие этапу III, с установившейся средней плотностью теплового потока $\bar{q} = 31.2 \text{ кВт/м}^2$. Особый интерес представляют участок в проме-

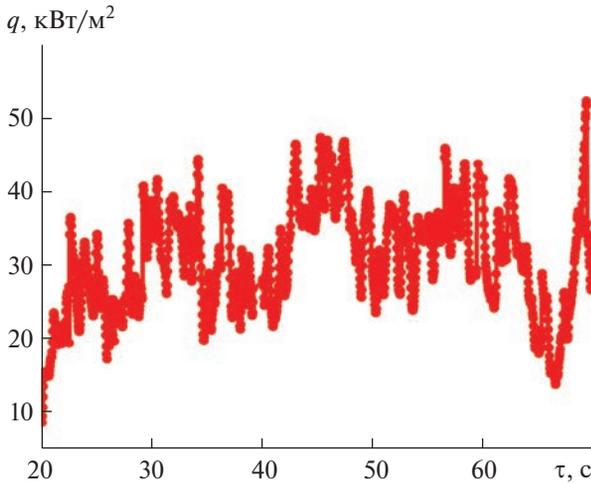


Рис. 5. Временная теплограмма на этапе конденсации III.

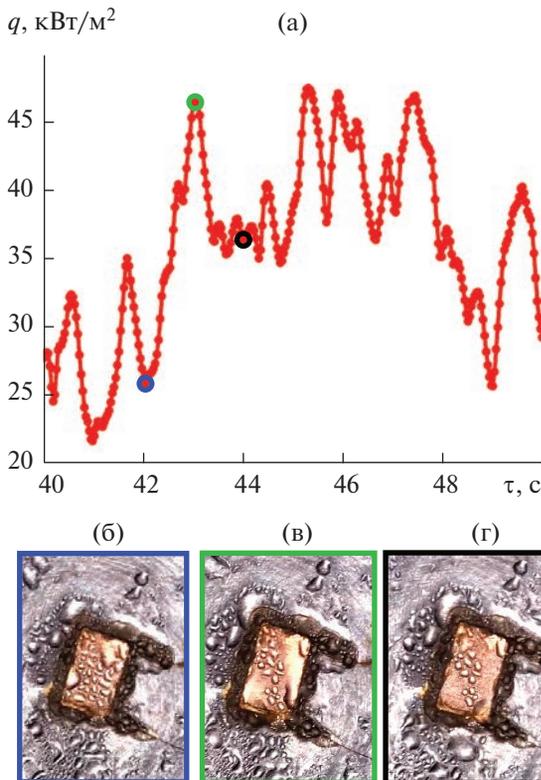


Рис. 6. Временная теплограмма на этапе конденсации III в промежутке времени от 40 до 50 с (а) и фотографии течения в моменты времени $\tau = 42$ (б), 43 (в) и 44 с (г).

жутке времени от 40 до 50 с, где средняя плотность теплового потока возрастает до $\bar{q} = 42.4 \text{ кВт/м}^2$, и участок между 60 и 70 с, на котором наблюдается изменение мгновенной плотности теплового потока от $q = 15$ до 53 кВт/м^2 . Рассмотрим отмеченные участки подробнее.

Временная теплограмма и фотографии течения на рис. 6 соответствуют промежутку времени от 40 до 50 с. Сопоставление пульсаций плотности теплового потока и фотографий течения подтверждает, что сравнительно низкое значение плотности теплового потока $\bar{q} = 25.8 \text{ кВт/м}^2$ (рис. 6а) объясняется удержанием капель конденсата на поверхности и их слиянием (рис. 6б). При стекании капель с поверхности ГДТП (рис. 6в) средняя толщина конденсатной пленки уменьшается, поэтому плотность теплового потока возрастает до $q = 46.8 \text{ кВт/м}^2$. После стекания конденсата на поверхности ГДТП образуются новые капли (рис. 6г), что снижает плотности теплового потока до $q = 36.8 \text{ кВт/м}^2$.

На рис. 7 приведены результаты, соответствующие промежутку времени от 60 до 70 с, когда плотность теплового потока увеличивается до $\bar{q} =$

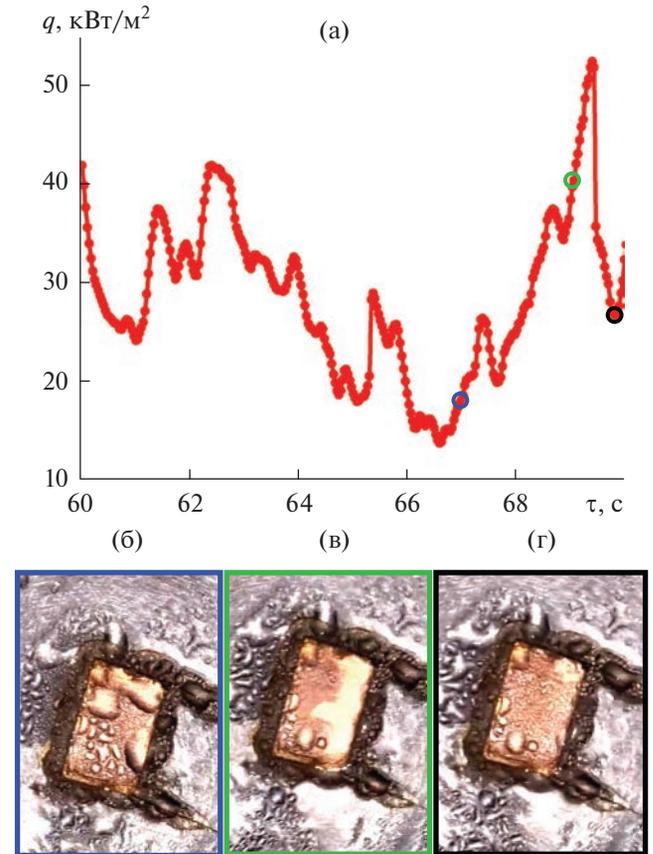


Рис. 7. Временная теплограмма на этапе конденсации III в промежутке времени от 60 до 70 с (а) и фотографии течения в моменты времени $\tau = 67$ (б), 69 (в) и 70 с (г).

$= 42.4 \text{ кВт/м}^2$ (рис. 7а). При слиянии капель (рис. 7б) плотность теплового потока уменьшается, а при стекании крупных капель (рис. 7в) увеличивается. После высвобождения поверхности происходит формирование новых капель (рис. 7г), ведущее к уменьшению плотности теплового потока, капли начинают объединяться и процесс повторяется. Полученный результат соответствует классическим представлениям о капельной конденсации [20, 21], когда слияние капель конденсата рассматривается как одна из причин интенсификации теплообмена.

Проведена серия экспериментов с искусственным увеличением расхода. Для этого на поверхность ГДТП через иглу шприца подводилась вода с температурой, близкой к 60°C , что приводило к формированию пленки на поверхности теплообмена. Эксперименты показали, что при натекании нагретой жидкости на поверхность ГДТП плотность теплового потока резко увеличивается, а после высвобождения поверхности начинается формирование новых капель. На рис. 8а представлена временная теплограмма, соответствующая экспериментам с искусственным подводом жидкости. В промежутке времени от 20 до 40 с к поверхности пластины подведено шесть капель нагретой воды, что отображено на временной теплограмме. Пульсации плотности теплового потока соответствуют натеканию жидкости на поверхность ГДТП (рис. 8б–8г).

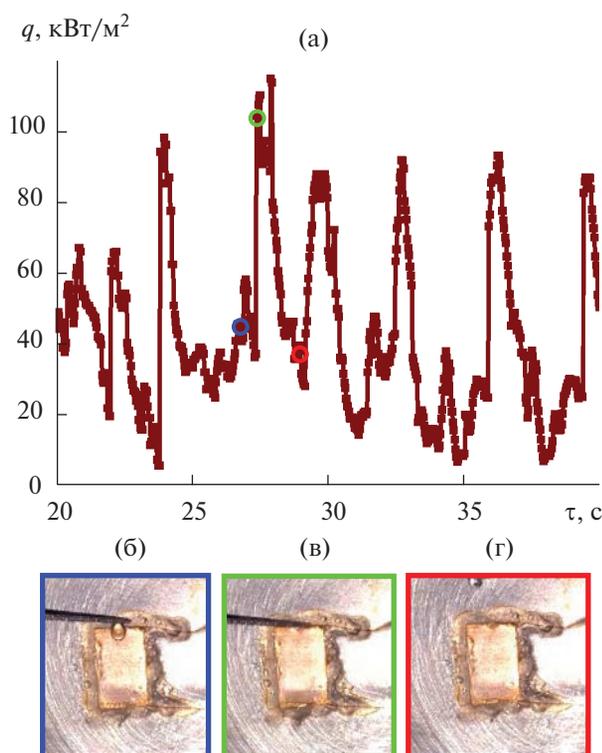


Рис. 8. Временная теплограмма при искусственном подводе конденсата (а) и фотографии течения в моменты времени $\tau = 27$ (б), 27.5 (в) и 28 с (г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совмещение градиентной теплотметрии и визуализации течения позволяет комплексно исследовать теплообмен при конденсации. Подтверждено, что пульсации плотности теплового потока обусловлены образованием и движением капель.

Оценена средняя местная плотность теплового потока: при образовании первых капель $\bar{q} = 3.2 \text{ кВт/м}^2$, при увеличении их размеров $\bar{q} = 9.6 \text{ кВт/м}^2$ и при установлении капельно-ручейковой конденсации $\bar{q} = 31.2 \text{ кВт/м}^2$. Установлено, что при стекании ручейка и освобождении поверхности от конденсата плотность теплового потока может резко увеличиваться (на рис. 7 – от 14 до 53 кВт/м^2 за 2 с). После образования и роста новых капель плотность теплового потока снижается.

Эксперименты с искусственным подводом конденсата подтвердили, что градиентная теплотметрия применима к изучению натекания конденсата. Регистрировать мгновенное изменение плотности теплового потока, связанное с увеличением толщины конденсатной пленки, возможно и без визуализации.

Исследование носит методологический характер и посвящено применению градиентной теплотметрии к измерению теплового потока при капельно-ручейковой конденсации. Для изучения физических особенностей и условий организации капельной конденсации необходимо проведение дополнительных экспериментов. Результаты исследований показали, что градиентная теплотметрия может быть использована для мониторинга теплообмена при конденсации без визуализации течения, что необходимо для изучения процесса на внутренних поверхностях труб и при промышленных экспериментах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 22-29-00152).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee Y.-G., Jang Y.-J., Choi D.-J. An Experimental Study of Air–Steam Condensation on the Exterior Surface of a Vertical Tube under Natural Convection Conditions // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 104. P. 1034.
2. Su J., Sun Z., Ding M., Fan G. Analysis of Experiments for the Effect of Noncondensable Gases on Steam Condensation over a Vertical Tube External Surface under Low Wall Subcooling // *Nucl. Eng. Des.* 2014. V. 278. P. 644.
3. Fan G., Tong P., Sun Z., Chen Y. Development of a New Empirical Correlation for Steam Condensation Rates in the Presence of Air Outside Vertical Smooth Tube // *Ann. Nucl. Energy*. 2018. V. 113. P. 139.
4. Zhang J.X., Wang L. Experimental Study of Air Accumulation in Vapor Condensation Across Horizontal Tube // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. V. 111. P. 860.
5. Tubes J.Li, Wang H.F., Sang Z.F. Enhanced Condensation Outside Horizontal Heat Transfer // *AIP Conf. Proc.* 2010. V. 1207. P. 628.

6. *Swartz M.M., Yao Sh.-Ch.* Experimental Study of Turbulent Natural-convective Condensation on a Vertical Wall with Smooth and Wavy Film Interface // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 113. P. 943.
7. *Lel V.V., Al-Sibai F., Renz U.* Local Thickness and Wave Velocity Measurement of Wavy Films with a Chromatic Confocal Imaging Method and a Fluorescence Intensity Technique // *Exp. Fluids.* 2005. V. 39. P. 856.
8. *Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.V., Babich A.Y., Zainullina E.R.* An Investigation into Film Condensation of Saturated Steam on Tube Surfaces by a Gradient Heatmetry // *Therm. Eng.* 2021. V. 68. P. 794.
9. *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р.* Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплотметрии // *Письма ЖТФ.* 2019. Т. 45. Вып. 7. С. 15.
10. *Kuznetsov G.V., Ponomarev K.O., Feoktistov D.V., Orlova E.G., Lyulin Yu.V., Ouerdane H.* Heat Transfer in a Two-phase Closed Thermosyphon Working in Polar Regions // *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2021. V. 22. 100846.
11. *Xiao R., Miljkovic N., Enright R., Wang E.* Immersion Condensation on Oil-infused Heterogeneous Surfaces for Enhanced Heat Transfer // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. 1988.
12. *Tan B., Tian W.X., Chen R.H., Qui S.Z., Su G.H.* Experimental Study of Air–Steam–Mixture Condensation Underneath Containment Vessel Surface // *Nucl. Sci. Eng.* 2021. V. 195. P. 838.
13. *Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.V., Pavlov A.V., Bobylev P.G., Kikot N.E., Bikmulin A.V.* Comprehensive Study of Boiling Regimes with Use of High-speed Imaging and Gradient Heatmetry // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2127. 012058.
14. *Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Seroshtanov V.V., Guskov A.A.* The Combination of PIV and Heat Flux Measurement in Study of Flow and Heat Transfer near a Circular Finned Cylinder // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1421. 012064.
15. *Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V.* Heatmetry the Science and Practice of Heat Flux Measurement. St.-Petersburg: Springer Int. Publ., 2020. P. 209.
16. *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 теплотметрии // *Тепловые процессы в технике.* 2021. Т. 13. № 10. С. 434.
17. *Митяков В.Ю., Павлов А.В., Бобылев П.Г.* Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь–никель // *Матер. межвуз. науч.-тех. конф. “Неделя науки СПбПУ”. Энергетика и транспорт (ИЭ).* 18–23 ноября 2019. СПб.: Политехпресс, 2020.
18. *Tinevez J.Y., Perry N., Schindelin J., Hoopes G.M., Reynolds G.D., Laplantine E., Bednarek S.Y. et al.* TrackMate: An Open and Extensible Platform for Single-particle Tracking // *Methods.* 2017. V. 115. P. 80.
19. *Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.* Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
20. *Исаченко В.П.* Теплообмен при конденсации. М.: Энергия, 1977. 240 с.
21. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача при конденсации и кипении. JL: Машгиз, 1952. 231 с.