

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 402–409  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 402–409

Научная статья  
УДК 536.24.083  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177131>

## Исследование пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием

Ю.А. Кузма-Кичта<sup>1</sup>✉, А.В. Лавриков<sup>1</sup>, Н.С. Иванов<sup>1</sup>, Д.В. Горбачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

✉ [kuzma@itf.mpei.ac.ru](mailto:kuzma@itf.mpei.ac.ru)

**Аннотация.** Исследованы теплоотдача и пульсации местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием. Местная плотность теплового потока и его пульсации измерены с помощью методов градиентной теплотометрии. Представлены данные по теплоотдаче и пульсациям местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием и рассчитаны спектры пульсаций местной плотности теплового потока в диапазонах тепловых нагрузок 125–170 кВт/м<sup>2</sup>, газосодержаний 12–30% и давлений 52–55 кПа. Установлено, что при конденсации водяного пара на трубе с покрытием с ростом газосодержания наблюдается снижение амплитуды пульсаций местной плотности теплового потока, энергии спектра. При конденсации на трубе с покрытием амплитуда и энергия пульсаций местной плотности теплового потока больше, чем для трубы без покрытия.

**Ключевые слова:** теплообмен при конденсации, градиентная теплотометрия, датчики местной плотности теплового потока, временные теплотометрии, спектры пульсаций плотности локального теплового потока, гидрофобное покрытие

**Для цитирования.** Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Иванов Н.С., Горбачев Д.В. Исследование пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием // Тепловые процессы в технике. Т. 15. № 9. С. 402–409.

Original article

## Studying pulsations of local thermal flow density while condensation on a pipe with hydrophobic coating

Yu.A. Kuzma-Kichta<sup>1</sup>✉, A.V. Lavrikov<sup>1</sup>, N.S. Ivanov<sup>1</sup>, D.V. Gorbachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia*

✉ [kuzma@itf.mpei.ac.ru](mailto:kuzma@itf.mpei.ac.ru)

**Abstract.** The authors studied both heat transfer and pulsations of the heat flux local density during condensation on a pipe with a hydrophobic coating. The local heat flux and its fluctuations were measured by gradient thermometry methods. The article presents data on heat transfer and flux local density fluctuations while its condensation on a pipe with a hydrophobic coating and computational results of the heat flux condensation on a pipe with hydrophobic coating within the range of heat loadings of 125–170 kW/m<sup>2</sup>, gas contents of 12–30% and pressures of 52–55 kPa. It is revealed that with the water steam condensation on the pipe with coating, amplitude pulsations of the heat flux local density and spectrum energy are being decrease with gas

© Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Иванов Н.С., Горбачев Д.В., 2023

content increasing. Both amplitude and energy pulsations of the heat flux local density are greater for the pipe with coating than for the one without it.

**Keywords:** heat transfer during condensation, gradient heat logging, sensors of heat flow local density, time thermograms, local heat flow density fluctuation spectra, hydrophobic coating

**For citation.** Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Ivanov N.S., Gorbachev D.V. Studying pulsations of local thermal flow density while condensation on a pipe with hydrophobic coating. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 402–409.

## Введение

Исследование механизма теплообмена при конденсации необходимо для совершенствования многих теплообменных аппаратов. Важным фактором, влияющим на интенсивность теплоотдачи при конденсации, является газосодержание. Согласно имеющимся данным [1, 2] с ростом газосодержания теплоотдача при конденсации резко уменьшается. Поэтому проблема конденсации при наличии неконденсирующихся газов требует дальнейшего изучения.

В настоящее время известны данные по пульсациям местной плотности теплового потока при конденсации на трубе без покрытия, полученные с помощью градиентной термометрии [3]. Пространственная и временная неоднородности плотности локального теплового потока возникают вследствие волнового движения конденсата на границе жидкость–пар [4, 5]. Волны на границе раздела фаз приводят к конвективному перемешиванию конденсатной пленки и интенсификации теплоотдачи. Однако данные по пульсациям местной плотности теплового потока при конденсации на трубе без покрытия крайне ограничены, и на трубе с гидрофобным покрытием отсутствуют.

В работе [6] проводилось кинематографическое исследование конденсации хладона R21 на одиночных горизонтальных цилиндрах различного диаметра. Выделены три режима стекания конденсата. При малых тепловых потоках конденсат стекал в виде отдельных капель, при увеличении теплового потока росла частота отрыва капель и образовывались сплошные струи, дальнейшее увеличение тепловой нагрузки привело к стеканию с цилиндра сплошной пленки конденсата.

В работе [7] при исследовании возникновения капельной конденсации предложена функция распределения капель по поверхности в диапазоне радиусов от  $r$  до  $r_{\max}$ . При сравнении

функции распределения капель с имеющимися экспериментальными данными получено согласование.

В работе [8] изучались пульсации температуры стенки при конденсации на медной пластине размером  $50 \times 50$  мм с помощью медь-константановых термопар с размером спая 0,6 мм. Измерения проводились в присутствии неконденсирующихся газов. Решалась нестационарная задача теплопроводности в пластине и получено изменение местной плотности теплового потока от времени. Пульсации местной плотности теплового потока составляли 80% от его среднего значения.

В работе [9] изучались пульсации температуры стенки при конденсации при помощи тонкопленочных резисторов. Измерения проводились при конденсации на поверхностях из кварцевого стекла, нержавеющей и углеродистой стали при различных плотностях теплового потока. Неконденсирующиеся газы откачивались из рабочей камеры.

При конденсации на поверхности из кварцевого стекла давление насыщения составляло 9,5 кПа. Температурный напор и плотность теплового потока изменялись в пределах от 1,1 К и  $16,6 \text{ кВт/м}^2$  до 2,6 К и  $32,9 \text{ кВт/м}^2$ .

При конденсации на поверхности из нержавеющей стали давление насыщения составляло 9 кПа, диапазон температурных напоров 1,5–3,2 К, при плотности теплового потока 54–96  $\text{кВт/м}^2$ .

При конденсации на поверхности из углеродистой стали давление насыщения составляло 8,5 кПа, плотность теплового потока  $89,5 \text{ кВт/м}^2$ , температурный напор 1,7 К.

Согласно термограммам с ростом местной плотности теплового потока амплитуда пульсаций температуры стенки увеличивается, а период колебаний уменьшается. Объясняется это тем, что с ростом местной плотности теп-

лового потока возрастают скорость роста капель и температурный напор. Отмечается, что при одинаковой плотности теплового потока температурный напор оказывается меньше у материала с большим коэффициентом теплопроводности.

В работах [3, 10] изучались пульсации местной плотности теплового потока при пленочной конденсации на горизонтальной трубе. С помощью метода градиентной теплотрии получены теплограммы при конденсации на трубе с различным углом наклона.

При всех азимутальных углах  $\varphi$  конденсация является нестационарной, о чем свидетельствуют пульсации плотности локального теплового потока. Наибольшая осредненная местная плотность теплового потока соответствует повороту установки на азимутальный угол  $\varphi = 60^\circ$ .

В работе [10] представлены данные по пульсациям местной плотности теплового потока. Методика основана на измерении пульсаций местной плотности теплового потока градиентными датчиками и одновременном визуальном наблюдении конденсации. Сопоставление полученных теплограмм с визуальными данными показало, что наименьшая местная плотность теплового потока наблюдалась при образовании на поверхности больших неподвижных капель, в то время как при объединении и скатывании капель толщина конденсатной пленки уменьшалась и местная плотность теплового потока возрастала. Этот результат подтверждает, что пульсации местной плотности теплового потока связаны с движением конденсата по поверхности.

В работе [11] изучалось изменение температуры поверхности при конденсации, были получены фазовые портреты при пленочной конденсации на вертикальной пластине неподвижного пара и пленочной конденсации движущегося пара в трубе. Фазовые портреты представляли собой множество точек, лежащих на эллиптических орбитах, что соответствует периодическому изменению температуры поверхности во времени.

Целью настоящей работы является измерение теплоотдачи и изучение пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на горизонтальной трубе с гидрофобным покрытием при наличии неконденсирующихся газов.

## Описание установки

Подробное описание методики и экспериментальной установки дано в работе [12]. Исследование конденсации проводилось на экспериментальной установке, которая состояла из основного и вспомогательного контуров. В рабочей камере установлены медная трубка и нагреватель. Схема установки показана на рис. 1.

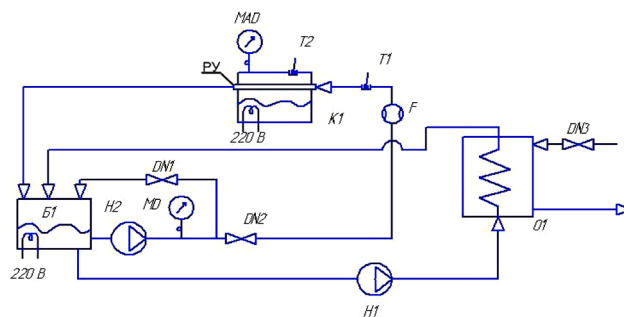


Рис. 1. Схема установки

Экспериментальная установка включает вентиль DN, бак Б1 емкостью 50 л, трубчатый электронагреватель ТЭН, расходомер F, охладитель О1, механический манометр MD для измерения давления основного контура, электронный манометр MAD для измерения давления в конденсаторе, платиновый термометр сопротивления ТСУП-205-Н (измеряет температуру жидкости), T1, платиновый термометр сопротивления (измеряет температуру пара), T2, рабочую камеру, К1, многоступенчатый центробежный насос МН1 203 3, Н1, вертикальный многоступенчатый центробежный насос IPL 32/165-3/2, Н2, рабочий участок РУ.

Давление внутри камеры измерялось электронным манометром. Вспомогательный контур необходим для охлаждения теплоносителя. Для получения достаточного перепада температур охлаждающей жидкости в рабочем участке устанавливался вытеснитель диаметром 10 мм, поток воды двигался в кольцевой щели шириной 2,5 мм.

Основной контур состоит из рабочей камеры, насоса и резервуара с водой. Рабочая камера представляет собой герметичный сосуд с расположенным в ее центре рабочим участком – медной трубкой диаметром 14 мм и длиной 560 мм, на которой происходила конденсация пара. В нижней части рабочей камеры установлен электронагреватель. С помощью нагревателя дистиллированная вода в рабочей

камере нагревалась до температуры насыщения и испарялась. На поверхности рабочего участка установлен градиентный гомогенный датчик теплового потока [13].

Принцип действия ГДТП основан на поперечном эффекте Зеебека: в сечениях датчика, нормальных вектору внешнего теплового потока, возникает поперечная разность температур и генерируется пропорциональная этой разности термоЭДС. Эта методика активно разрабатывается научной группой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого с 1996 г. [13].

На рис. 2 показан ГДТП, установленный в углублении на поверхности медной трубы. ГДТП представляет собой пластину из монокристаллического висмута размером  $5 \times 5$  мм при толщине 0,3 мм. Для контроля температуры поверхности вблизи датчика установлена термопара.

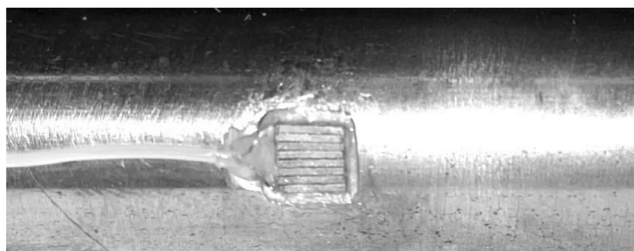


Рис. 2. ГДТП, установленный в углублении на поверхности рабочего участка

На медную трубу нанесено гидрофобное покрытие. Методика нанесения гидрофобного покрытия заключалась в формировании на поверхности трубы комбинированной структуры, состоящей из микрошероховатости и слоя наночастиц, что обеспечивало краевой угол 150 градусов [14].

#### Данные по теплоотдаче при конденсации водяного пара на трубе с гидрофобным покрытием и без покрытия

Данные по теплоотдаче при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием при различных давлениях и газосодержаниях представлены на рис. 3. Там же показаны результаты расчета теплоотдачи по формуле В.П. Исаченко с поправкой на газосодержание 18% при  $P = 0,018$  МПа и по формуле В. Нуссельта с поправкой на газосодержание 18%.

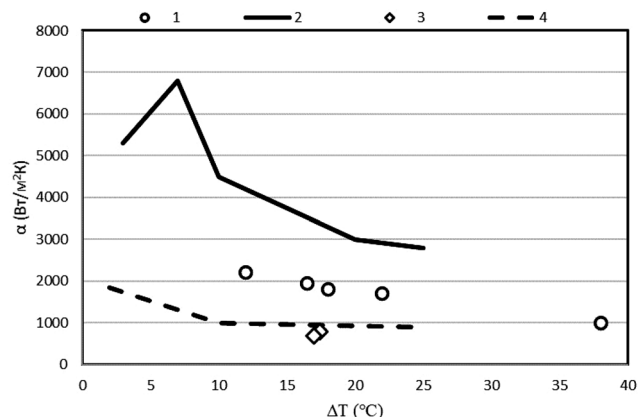


Рис. 3. Данные по теплоотдаче при конденсации на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием: 1 – трубка с покрытием, газосодержание 12%,  $P = 0,018$  МПа, 2 – формула В.П. Исаченко с поправкой на газосодержание 18%,  $P = 0,018$  МПа, 3 – полученные данные для трубки без покрытия, газосодержание 18%,  $P = 0,012$ – $0,014$  МПа, 4 – формула В. Нуссельта с поправкой на газосодержание 18%, температурный напор –  $\Delta T$  °C,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>.

В области высоких температурных напоров и газосодержаний средние коэффициенты теплоотдачи для трубы без покрытия и с покрытием близки. С ростом давления коэффициент теплоотдачи возрастает. Согласно полученным данным гидрофобное покрытие приводит к росту теплоотдачи до двух раз при конденсации на трубе при газосодержании 18%.

#### Исследование пульсаций локального теплового потока

На рис. 4 представлена схема метода, применяемого для измерения пульсаций плотности локального теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием.

Метод основан на регистрации колебаний термоЭДС на датчике с помощью цифрового преобразователя (FLUKE 8845A/C 240V, максимальное разрешение 100 нВ). Сигнал датчика через мультиметр передается на компьютер, после чего строится временная диаграмма пульсаций теплового потока.

На рис. 5 представлены пульсации локального теплового потока при конденсации водяного пара на трубе с покрытием, измеренные при азимутальном угле 45 градусов, температурном напоре 60 °C в диапазоне газосодержаний 12–30%. Перед регистрацией данных проводилась откачка рабочей камеры до газосодержания 12% и давления 52,8 кПа, включался нагрев и регистрировались пульсации локального теплового

потока. Согласно измерениям пульсации местной плотности теплового потока не превысили 27% от среднего значения. Во время проведения эксперимента газосодержание в камере возросло с 12 до 30%.

На рис. 5 – типичные полученные результаты при конденсации на трубе с покрытием.

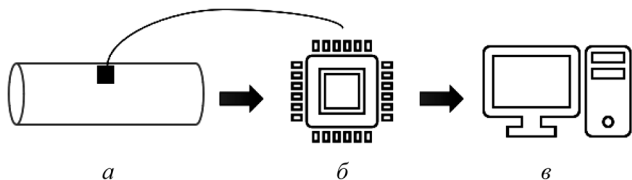


Рис. 4. Схема измерения пульсаций плотности локального теплового потока: а – трубка с датчиком, б – цифровой преобразователь, в – программный комплекс для обработки полученных данных

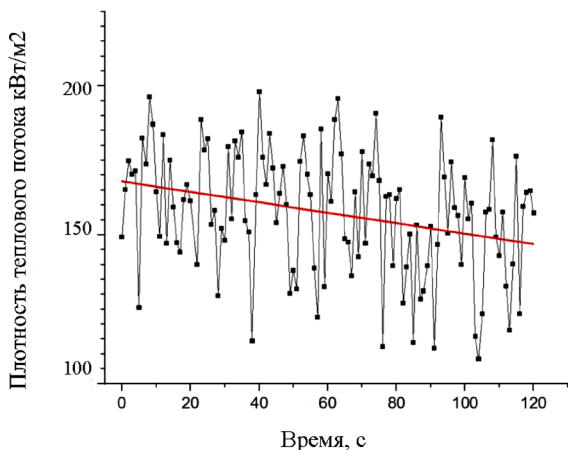


Рис. 5. Пульсации локального теплового потока при конденсации на трубе с покрытием. Азимутальный угол 45 градусов, температурный напор 25°C, диапазон газосодержаний 12–30%.

В работе [3] при азимутальном угле 0 градусов средняя величина тепловой нагрузки составляет 125 кВт/м<sup>2</sup>, амплитуда пульсаций достигала 50 кВт/м<sup>2</sup>. При азимутальном угле 60 градусов амплитуда пульсаций достигала 40 кВт/м<sup>2</sup>. В проведенном нами опыте при азимутальном угле установки датчика 45 градусов амплитуда пульсаций достигала 50 кВт/м<sup>2</sup>.

В настоящей работе исследовалась труба с гидрофобным покрытием, датчик был покрыт слоем изоляции, и регистрация данных происходила дискретно. Из-за нанесенного покрытия на поверхности датчика создавалось дополнительное термическое сопротивление. Имеющееся оборудование в отличие от работы [3] не позволяло фильтровать сигнал, что вносило дополнительную неопределенность в измерения.

Поэтому пульсации местной плотности теплового потока в настоящей работе отличаются от результатов [3].

Проведен расчет спектров пульсаций местной плотности теплового потока при различных газосодержаниях по методике, предложенной в работе [15] (рис. 6).

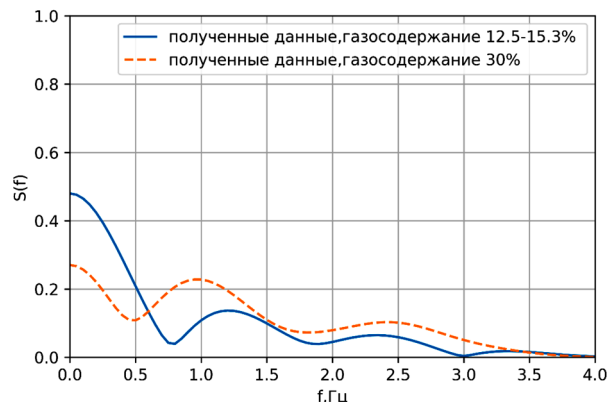


Рис. 6. Спектр пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на горизонтальной трубе с покрытием для азимутального угла установки ГДТП 45 градусов и газосодержании 12,5–15,3%, 30%.

Анализ полученных данных показал, что при росте газосодержания наблюдается снижение амплитуды и энергии пульсаций местной плотности теплового потока.

Используя данные работы [3] по колебаниям местной плотности теплового потока при конденсации на трубе без покрытия для азимутального угла установки ГДТП 60 градусов, нами по разработанной методике проведен расчет спектра пульсаций. На рис. 7 представлено сравнение спектров пульсаций местной плотности теплового потока для трубы без покрытия и с гидрофобным покрытием.

При конденсации на трубе с покрытием в спектре наблюдаются пульсации с большей энергией из-за того, что в этом случае краевой угол больше и капли при конденсации будут меньшего диаметра, и теплоотдача, а соответственно, пульсации местной плотности локального теплового потока увеличатся.

В работе проведен анализ влияния смачивания поверхности рабочего участка на пульсации местной плотности теплового потока при конденсации на трубе без покрытия и с покрытием. С этой целью сравнены пульсации местной плотности теплового потока в настоящей работе (медная труба с гидрофобным покрытием) и без

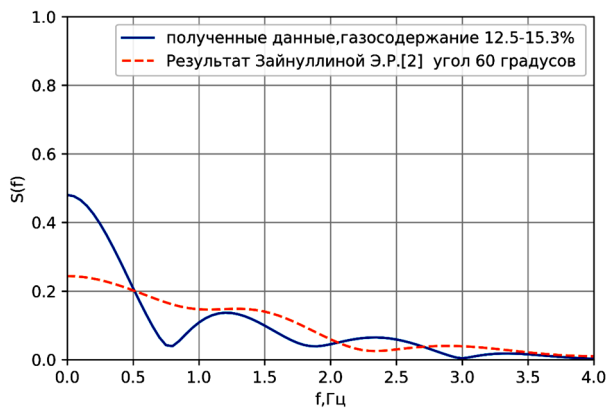


Рис. 7. Спектр пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе без покрытия для азимутального угла установки ГДТП 60 градусов [3] и с гидрофобным покрытием для азимутального угла установки ГДТП 45 градусов и газосодержания 12,5–15,3%.

покрытия в исследовании Э.Р. Зайнуллиной [3] (труба из нержавеющей стали). С помощью данных по шероховатости для технически гладкой поверхности [16] получены оценки краевых углов для поверхностей из меди ( $\sim 90^\circ$ ) и нержавеющей стали ( $\sim 75^\circ$ ) и построена зависимость местной плотности теплового потока и его пульсаций при конденсации на трубе без покрытия и с гидрофобным покрытием ( $\sim 150^\circ$ ) от краевого угла (рис. 8). Как показал анализ, неопределенность измерения местной плотности теплового потока и его пульсаций при конденсации на трубе в исследованных условиях не превышает 30%.

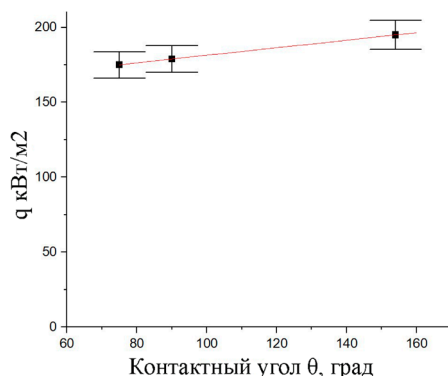


Рис. 8. Зависимость местной плотности теплового потока и его пульсаций при конденсации на трубе без покрытия и с покрытием от краевого угла.

Таким образом, можно предположить, что влияние смачивания на показания датчика не будет увеличивать сильно неопределенности измерений.

## Заключение

Исследованы теплоотдача и пульсации местной плотности теплового потока при конденсации водяного пара на трубе с гидрофобным покрытием в диапазонах давлений 0,01–0,1 МПа, тепловых нагрузок 125–170 кВт/м<sup>2</sup>, газосодержаний 12,5–30%. Местная плотность теплового потока и его пульсации при конденсации на трубе с покрытием измерены с помощью градиентного датчика, разработанного в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Рассчитаны спектры пульсаций плотности локального теплового потока на трубе с покрытием при различных газосодержаниях. Установлено, что при конденсации водяного пара на трубе с покрытием с ростом газосодержания наблюдается снижение амплитуды пульсаций местной плотности теплового потока и энергии спектра. При конденсации на трубе с покрытием амплитуда и энергия пульсаций местной плотности теплового потока больше, чем для трубы без покрытия. Это происходит из-за того, что на трубе с гидрофобным покрытием краевой угол больше и при конденсации возникнут капли меньшего диаметра и пульсации местной плотности теплового потока увеличатся.

## Список источников

1. Henderson C.L., Marchello J.M. Film Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas // Journal of Heat Transfer. 1969. Vol. 91. No. 3. P. 447–450.
2. Комендантов А.С., Ковалев А.С., Петухов Б.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи при конденсации пара четырехоксида азота, частично прошедшего вторую стадию диссоциации // Теплофизика высоких температур. 1971. Т. 9. № 1. С. 184–187.
3. Зайнулина Э.Р. Градиентная теплометрия в исследовании теплообмена при конденсации пара на наружной поверхности трубы: дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. 117 с.
4. Ли, Шао Лин. Тейлоровская неустойчивость пленки жидкости на длинном горизонтальном круговом цилиндре в неподвижном воздухе // Прикладная механика. 1963. Т. 30. № 3. С. 140–145.
5. Шемагин И.А., Будов В.М., Соколов В.А. О волнах межфазной поверхности при конденсации пара // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1983. № 3. С. 160–162.
6. Гогонин И.И., Дорохов А.Р. Теплообмен при конденсации пара фреона-21 на горизонтальных трубах // Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия технических наук. 1975. Вып. 3. № 13. С. 81–84.

7. **Le Fevre, E.J. and Rose, J.W.** A Theory of Heat Transfer by Dropwise Condensation // *Proceedings of Third International Heat Transfer Conference* (Chicago, Illinois, August 7-12), 1966. P. 362–375.
8. **Ohtani S., Chiba Y., Ohwaki M.** Heat Transfer in Dropwise Condensation of Steam // *Chemical Engineering*. 1972. Vol. 36(4). P. 412–418.
9. **Tsuruta T., Tanaka H., Togashi S.** Experimental verification of constriction resistance theory in dropwise condensation heat transfer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1991. Vol. 34. No. 11. P. 2787–2796.
10. **Митяков В.Ю., Зайнуллина Э.Р., Сапожников С.З., Греков М.А.** Исследование капельно-ручейковой конденсации методом градиентной теплотрии // *Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (17–22 октября 2022 г., Москва)*. В 2 т. Т. 1. Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. С. 325–326.
11. **Гогонин И.И., Шемагин И.А., Будов В.М., Дорохов А.Р.** Теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении в элементах оборудования АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.
12. **Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V. et al.** Wetting of Hydrophobic and Hydrophilic Coatings // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. Vol. 94. No. 6. P. 1549–1556.
13. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Градиентные датчики теплового потока. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2003. 202 с.
14. Способ формирования комбинированной супергидрофобной структуры поверхности: пат. Российская Федерация / Кузма-Кичта Ю.А., ЧуGUNKOV Д.В., Лавриков А.В., Иванов Н.С. № 2769107; заявл. 17.06.2021; опубл. 28.03.2022. Бюл. № 10.
15. **Кузма-Кичта Ю.А.** Исследование теплообмена и механизма кипения на металлической поверхности без покрытия и с малотеплопроводным покрытием: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: Институт высоких температур Академия наук СССР, 1974. 130 с.
16. **Краснов Ю.С., Борисоглебская А.П., Антипов А.В.** Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию, испытаниям и наладке. Москва: Интеграл, 2013. 372 с.
- Ph. D. thesis. Saint-Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019, 117 p. (In Russ.)
4. **Lee, Shao-Lin.** Teilorovskaya neustoichivost' plenki zhidkosti na dlinnom gorizont'al'nom krugovom tsilindre v nepodvizhnom vozdukh [Taylor Instability of a Liquid Film Around a Long, Horizontal, Circular Cylindrical Body in Still Air]. *Prikladnaya mekhanika*, 1963, vol. 30, iss. 3, pp. 140–145 (In Russ.)
5. **Shemagin I.A., Budov V.M., Sokolov V.A.** O volnakh mezhfaznoi poverkhnosti pri kondensatsii para [On interfacial surface waves in vapour condensation]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya Energetika i transport*, 1983, no. 3, pp. 160–162. (In Russ.)
6. **Gogonin I.I., Dorokhov A.R.** Teploobmen pri kondensatsii para freona-21 na gorizont'al'nykh trubakh. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk*, 1975, vol. 3, no. 13, pp. 81–84. (In Russ.)
7. **Le Fevre, E.J. and Rose, J.W.** A Theory of Heat Transfer by Dropwise Condensation. *Proceedings of Third International Heat Transfer Conference*. (Chicago, Illinois, August 7-12), 1966, pp. 362–375.
8. **Ohtani S., Chiba Y., Ohwaki M.** Heat Transfer in Dropwise Condensation of Steam. *Chemical Engineering*, 1972, vol. 36(4), pp. 412–418.
9. **Tsuruta T., Tanaka H., Togashi S.** Experimental verification of constriction resistance theory in dropwise condensation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, no. 11, pp. 2787–2796.
10. **Mityakov V.Yu., Zainullina E.R., Sapozhnikov S.Z., Grekov M.A.** Issledovanie kapel'no-rucheikovo kondensatsii metodom gradientnoi teplometrii [Investigation of drop-let-rub condensation by gradient thermometry]. *Materialy Vos'moi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu (17–22 October 2022, Moscow)*. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, 2022, pp. 325–326.
11. **Gogonin I.I., Shemagin I.A., Budov V.M., Dorokhov A.R.** Teploobmen pri plenochnoi kondensatsii i plenochnom kipenii v elementakh oborudovaniya AES [Heat transfer at film condensation and film boiling in NPP equipment elements]. Moscow, Energoatomizdat, 1993, 208 p.
12. **Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V. et al.** Wetting of Hydrophobic and Hydrophilic Coatings. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 6, pp. 1549–1556.
13. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V.** Gradientnye datchiki teplovogo potoka. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo, 2003, 202 p.
14. **Kuzma-Kichta Y.A., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V., Ivanov N.S.** Sposob formirovaniya kombinirovannoi supergidrofobnoi struktury poverkhnosti [Method of formation of combined superhydrophobic superfluid structure]. Patent Russian Federation no. 2769107 (2022).
15. **Kuzma-Kichta Y.A.** Issledovanie teploobmena i mekhanizma kipeniya na metalicheskoi poverkhnosti bez pokrytiya i s maloteploprovodnym pokrytiem [Investigation of heat transfer and boiling mechanism on uncoated and low-heat conductive coated metal surface]. Ph. D. thesis. Moscow: Institute for High Temperatures of the USSR Academy of Sciences, 1974, 130 p.

### References

1. **Henderson C.L., Marchello J.M.** Film Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas. *Journal of Heat Transfer*, 1969, vol. 91, no. 3, pp. 447–450.
2. **Komendantov A.S., Kovalev A.S., Petukhov B.S.** Eksperimental'noe issledovanie teplootdachi pri kondensatsii para chetyrekhokisi azota, chastichno proshedshego vtoruyu stadiyu dissotsiatsii [Experimental study of heat transfer during condensation of nitrogen tetraoxide vapour that has partially passed the second stage of dissociation]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1971, vol. 9, no. 1, pp. 184–187. (In Russ.)
3. **Zainulina E.R.** Gradientnaya teplometriya v issledovanii teploobmena pri kondensatsii para na naruzhnoi poverkhnosti truby [Gradientnaya teplometriya v issledovanii teploobmena pri kondensatsii para na naruzhnoi poverkhnosti truby].

16. **Krasnov Yu.S., Borisoglebskaya A.P., Antipov A.V.** Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya. Rekomendatsii po proektirovaniyu, ispytaniyam i naladke [Ventilation and air conditioning systems. Recommendations for design, testing and commissioning]. Moscow: Integral, 2013, 372 p.

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 10.09.2023; принята к опубликованию 12.09.2023.

The article was submitted on 01.08.2023; approved after reviewing on 10.09.2023; accepted for publication on 12.09.2023.