

Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 11. С. 507–514
Thermal processes in engineering, 2022, vol. 14, no. 11, pp. 507–514

Научная статья
УДК 532.64; 621.175
DOI: 10.34759/tpt-2022-14-11-507-514

Исследование локальной и средней теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с микро- и наноразмерным покрытием

Ю.А. Кузма-Кичта^{1✉}, Н.С. Иванов¹, Д.В. Чугунков¹,
А.В. Лавриков¹, А.С. Комендантов¹, А.В. Митяков²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
kuzma@itf.mpei.ac.ru[✉]

Аннотация. Исследована локальная и средняя теплоотдача при конденсации водяного пара на горизонтальной медной трубе без покрытия и с гидрофобным покрытием при наличии неконденсирующихся газов. Покрытие образовано комбинированной структурой, состоящей из слоя наночастиц углерода, микрошероховатости и силиконового масла. Микрошероховатость формировалась обработкой струей абразивного песка. Нанесение слоя наночастиц углерода привело к увеличению краевого угла до 160°. Исследование конденсации проводилось на экспериментальной установке, которая состояла из основного и вспомогательного контуров. В рабочей камере установлены труба из меди диаметром 12 мм и нагреватель. Приведены описания экспериментальной установки и методики исследования. Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации на трубе находились тепловая нагрузка на рабочем участке и температурный напор. Подводимая тепловая мощность к воде, охлаждающей рабочий участок, определялась по разнице температур теплоносителя на его входе и выходе. Перед проведением опытов проводилась тарировка тепловых потерь. Перепад температуры в пограничном слое со стороны жидкости определялся с использованием для коэффициента теплоотдачи формулы Б.С. Петухова при течении жидкости в канале. Локальная и средняя теплоотдача при конденсации на трубе водяного пара исследованы в диапазоне температурных напоров от 10 до 40 °С, газосодержаний – от 20 до 80 % и давлений – от 0.009 до 0.1 МПа. Для определения температуры стенки использовались платиновые термометры сопротивления и термодпары. При измерении локального теплового потока при конденсации на горизонтальной трубе использован градиентный датчик теплового потока на основе монокристалла висмута. Получены опытные данные и зависимости для расчета осредненной и локальной теплоотдачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием в исследованных условиях. Разработанное покрытие приводит к росту средней теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе в два раза.

Ключевые слова: локальная и средняя теплоотдача, конденсация, гидрофобность, наночастицы, неконденсирующийся газ

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (шифр научной темы FSWF-2020-0021).

Для цитирования. Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В., Лавриков А.В., Комендантов А.С., Митяков А.В. Исследование локальной и средней теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с микро- и наноразмерным покрытием // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 11. С. 507–514. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-11-507-514

Original article

The research of local and average heat transfer while condensation on a horizontal pipe with a micro- and nanoscale coating

**Yu.A. Kuzma-Kichta¹✉, N.S. Ivanov¹, D.V. Chugunkov¹,
A.V. Lavrikov¹, A.S. Komendantov¹, A.V. Mityakov²**

¹ National Research University "MPEI", Moscow, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

kuzma@itf.mpei.ac.ru✉

Abstract: Local and average heat transfer while the water vapor condensation on a horizontal copper pipe both without coating and with hydrophobic coating at the presence of non-condensable gases was studied. The coating was formed by a combined structure consisting of a carbon nanoparticles layer, micro-roughness and silicone oil. The micro-roughness was formed by the abrasive sand blasting. The carbon nanoparticles layer deposition led the contact angle increase up to 160°. The study of condensation was being conducted on the experimental setup, consisted of the main and auxiliary circuits. A copper pipe of the 12 mm diameter and a heater were installed in the working chamber. The article presents the descriptions of both experimental setup and research technique. To determine the average heat transfer coefficient during condensation on the pipe, the heat load in the working area and the temperature difference were being found. The heat power being supplied to the water that cools the working section was determined by the difference in the temperatures of the coolant at its inlet and outlet. The heat losses were calibrated prior to the experiments conducting. The temperature difference in the boundary layer on the liquid side was determined applying the B.S. Petukhov formula for the heat transfer coefficient for fluid flow in the channel. Local and average heat transfer while condensation on a water vapor pipe was studied in the range of temperature difference from 10 to 40 °C, gas content from 20 to 80 % and pressure from 0.009 to 0.1 MPa. Platinum resistance thermometers and thermocouples were employed to determine the wall temperature. When local heat fluxes measuring while condensation on a horizontal pipe, a gradient heat flux sensor based on a bismuth single crystal was applied. Experimental data and dependencies for the average and local heat transfer computing while water vapor condensation on a horizontal pipe without coating and with a developed coating under the studied conditions were obtained. The developed coating leads to the average heat transfer increasing while condensation on a horizontal pipe by a factor of two.

Keywords: local and average heat transfer, condensation, hydrophobicity, nanoparticles, non-condensable gas

Funding: The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSWF-2020-0021).

For citation. Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V., Komendantov A.S., Mityakov A.V. The research of local and average heat transfer while condensation on a horizontal pipe with a micro- and nanoscale coating. *Teplovyye protsessy v tekhnike = Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 11, pp. 507–514. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2022-14-11-507-514

Введение

В 1916 году немецкий инженер-исследователь В. Нуссельт [1] аналитически получил уравнение для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации неподвижного пара на горизонтальной трубе.

Советские ученые С.С. Кутателадзе [2] и Д.А. Лабунцов [3] учли влияние на теплообмен при конденсации неізотермичности стенки, волнообразования на поверхности жидкой пленки. В работах [4, 5] исследована пленочная конденсация в присутствии неконденсирующегося газа. В работах [6–8] предложена модель капельной конденсации на трубе.

Для повышения краевого угла и предотвращения образования пленки конденсата используют гидрофобные покрытия поверхности [9]. Гидрофобность – свойство, которое определяется параметрами и структурой поверхностного слоя. Поэтому для создания гидрофобных покрытий в первую очередь требуется анализ процессов, происходящих на наноразмерных и микроразмерных масштабах.

Формирование покрытия – это технологически сложный процесс, и для получения гидрофобного эффекта применяют современные методы, например нанесения слоя наночастиц или создание микроструктуры с заданной геометрией [10–12]. В агрессивной среде промышленных конденсаторов такие покрытия подвергаются механическому, тепловому и химическому воздействию. Высокая стоимость нанесения и недостаточная надежность гидрофобных покрытий приводят к возникновению пленочной конденсации. Поэтому необходимо, чтобы технология формирования покрытия имела низкую себестоимость, а покрытие сохраняло свойства продолжительный период.

Задачу интенсификации передачи тепла при конденсации на трубе осложняют неконденсирующиеся газы. Вакуумирование многоступенчатых конденсаторов ТЭЦ и АЭС экономически нецелесообразно, а присутствие в объеме пара таких газов, как водород, резко снижает теплоотдачу.

Средняя теплоотдачи при конденсации на трубе водяного пара исследована во многих работах, данные по локальной теплоотдаче крайне ограничены [13–15].

Таким образом, исследование локальной и средней теплоотдачи при конденсации водяно-

го пара на горизонтальной трубе с гидрофобным покрытием при наличии неконденсирующихся газов является актуальной задачей.

Формирование гидрофобного покрытия на горизонтальной трубе

При контакте водяного пара с трубой мелкодисперсные частицы воды проникают в гидрофобный слой и образуют пленку, которая вытесняет воздух и меняет свойства поверхности с гидрофобных на гидрофильные. Для предотвращения образования пленки необходимо добавлять в слой наночастиц полимерные вещества, масла [9]. В данной работе разработан метод гидрофобизации поверхности [16], основанный на формировании комбинированной структуры: слоя наночастиц углерода, микрошероховатости и силиконового масла. Микрошероховатость формировалась на поверхности медной трубы с помощью обработки абразивными частицами размером от 50 до 100 мкм. Экспериментально установлено, что формирование шероховатости с помощью абразивного песка аналогично механическому продавливанию с помощью твердых сфер. Для поверхностей с продавленной текстурой и обработанной абразивным песком крайние углы, характерные размеры впадин примерно равны (рис. 1). За характерный размер поверхности принят диаметр впадины. Поверхность промывали раствором щелочи и дистиллированной водой. На очищенную поверхность наносили наночастицы углерода размером от 5 до 50 нм. Формирование слоя наночастиц проводилось при помощи их осаждения из газовой фазы.

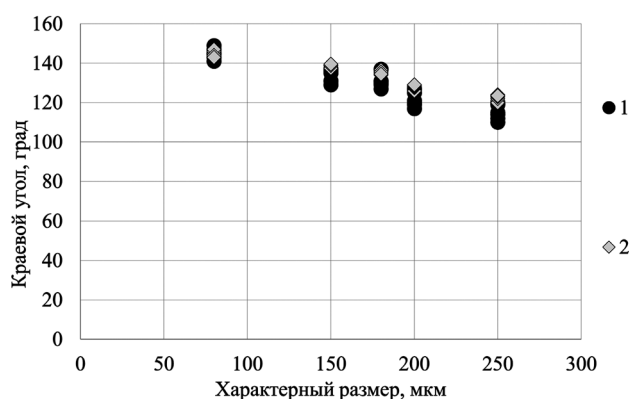


Рис. 1. Зависимость краевого угла от характерного размера поверхности: 1 – микроструктура, полученная механическим продавливанием; 2 – микроструктура, полученная при обработке абразивным песком

Поверхность с комбинированной шероховатостью для усиления гидрофобных свойств обрабатывали раствором силиконового масла в ацетоне с добавлением синтетического клея для улучшения адгезии частиц к поверхности. Фотография гидрофобной структуры показана на рис. 2.

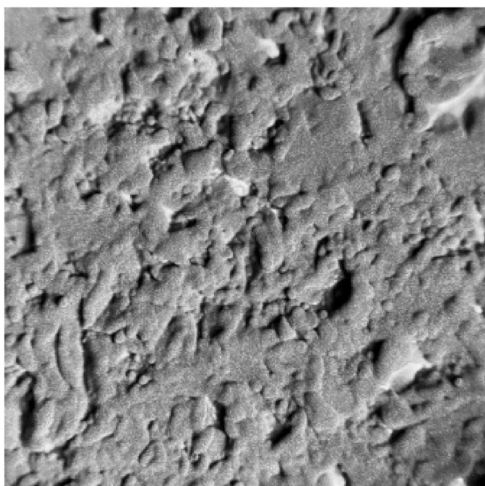


Рис. 2. Комбинированное гидрофобное покрытие

Методика исследования и экспериментальная установка

В настоящей работе исследуются средняя и локальная теплоотдача при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным гидрофобным покрытием. Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации на трубе находятся тепловая нагрузка на рабочем участке и температурный напор. Подводимая тепловая мощность к воде, охлаждающей рабочий участок, определяется по разнице температур теплоносителя на его входе и выходе. Перед проведением опытов проводится тарировка тепловых потерь. Перепад температуры в пограничном слое со стороны жидкости определяется с использованием для коэффициента теплоотдачи формулы Б.С. Петухова при течении жидкости в канале. Затем определялся перепад температуры в стенке рабочего участка и температура его наружной поверхности. Сравнение среднелогарифмического и среднеарифметического температурных напоров показало, что разница со-

ставляет не более 0.15 %. Вследствие чего для упрощения применялся среднеарифметический температурный напор. Для определения температуры стенки использовались платиновые термометры сопротивления и термопары.

Локальный тепловой поток регистрировался с помощью градиентного датчика теплового потока [13]. В углублении трубки был установлен датчик теплового потока на основе монокристалла висмута (рис. 3), закрепленный с помощью эпоксидной смолы, которую наносят на поверхность датчика и сушат в течение 30 минут. Соединительные провода закрывают для увеличения прочности.

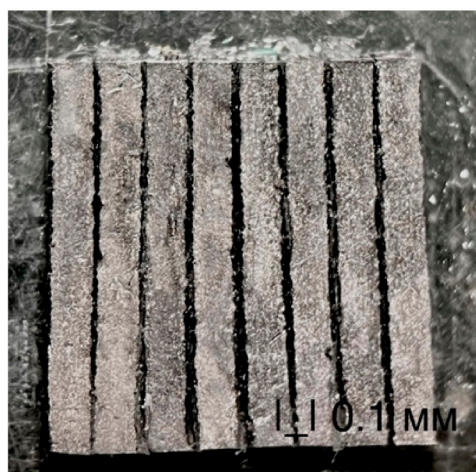


Рис. 3. Датчик теплового потока

Исследование конденсации проводилось на экспериментальной установке, которая состояла из основного и вспомогательного контуров. В рабочей камере установлены медная трубка диаметром 12 мм и нагреватель. Схема установки показана на рис. 4.

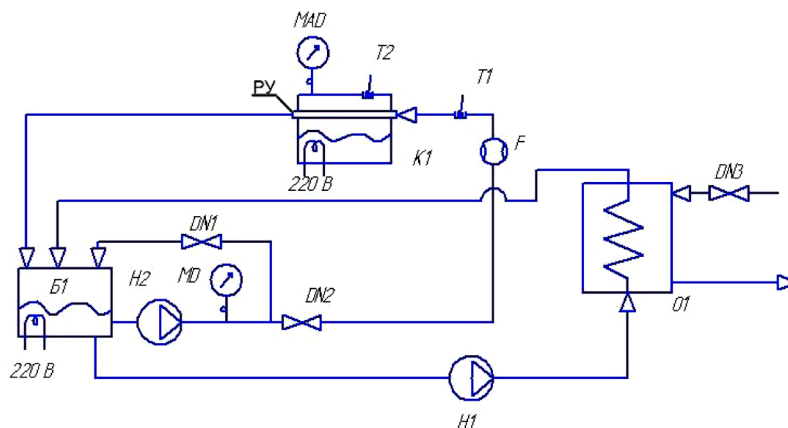


Рис. 4. Схема установки

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 МАD для измерения давления в конденсаторе; платиновый термометр сопротивления ТСУП-205-Н (измеряет температуру жидкости) Т1; платиновый термометр сопротивления (измеряет температуру пара) Т2; 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 устанавливался вытеснитель диаметром 10 мм, поток воды двигался в кольцевой щели шириной 2.5 мм.

Результаты исследования

В работе измерены средние и локальные коэффициенты теплоотдачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе с покрытием и без покрытия при различных газосодержаниях (рис. 5).

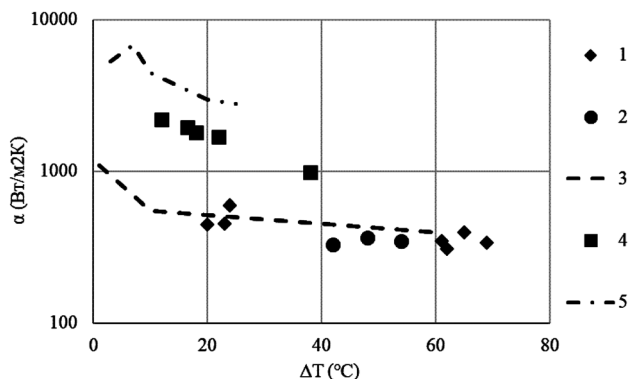


Рис. 5. Данные по средней теплоотдаче при конденсации на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием: 1 – опытные данные для трубы без покрытия, $P = 0.1$ МПа, газосодержание 60 %; 2 – опытные данные для трубы без покрытия, $P = 0.08$ МПа, газосодержание 42 %; 3 – аппроксимация данных Хендерсона [4], $P = 0.1$ МПа, газосодержание 60 %, $P = 0.018$ МПа; 4 – труба с разработанным покрытием, газосодержание 12 %; 5 – формула (1) при газосодержании 18 %

На рис. 5 представлена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от температурного напора. Данные измерений сопоставлены с рас-

четом по предложенным зависимостям. Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе без покрытия определяется по формуле Нуссельта с поправкой на содержание неконденсирующихся газов, полученной с использованием экспериментальных данных:

$$\frac{\alpha^*}{\alpha} = 0.964\varepsilon^{-0.81}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при содержании неконденсирующихся газов 0 %.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием рассчитывается по формуле (2), построенной с использованием формулы В.П. Исаченко и поправок на содержание неконденсирующихся газов и рельеф текстуры поверхности, полученных по опытным данным.

$$\frac{\alpha^*}{\alpha} = 0.521 \frac{\theta^*}{\theta} \varepsilon^{-0.856}. \quad (2)$$

В области высоких температурных напоров и газосодержаний средние коэффициенты теплоотдачи для трубы без покрытия и с покрытием близки. С ростом давления коэффициент теплоотдачи возрастает.

На рис. 6 представлена зависимость отношения средних коэффициентов теплоотдачи при конденсации водяного пара на трубе с покрытием и без покрытия от газосодержания. Опытные данные описаны уравнением (2) с отклонением 15 %.

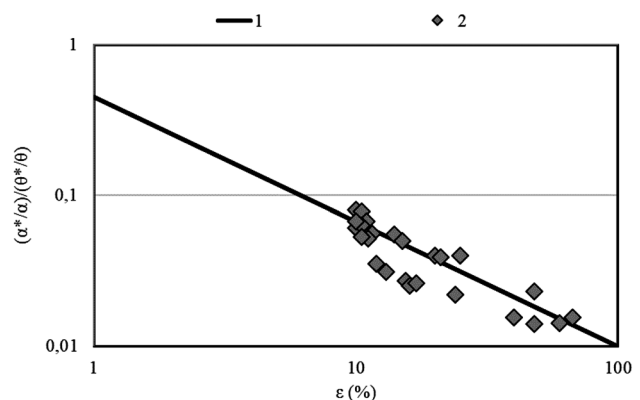


Рис. 6. Опытные данные по средней теплоотдаче при конденсации на горизонтальной трубе с покрытием: 1 – формула (2), θ^* – краевой угол 105° ; 2 – перепад температур $5-56^\circ\text{C}$, давление $0.009-0.038$ МПа

Данные по локальной теплоотдаче при конденсации водяного пара на горизонталь-

ной трубе с покрытием и без покрытия при различных газосодержаниях представлены на рис. 7 и 8. На рис. 7 приведено сравнение локального теплового потока, измеренного для трубы без покрытия, с данными работы [14]. При исследованных условиях коэффициент теплоотдачи снижается на 75 % при заполнении 25 % объема рабочей камеры неконденсирующимся газом.

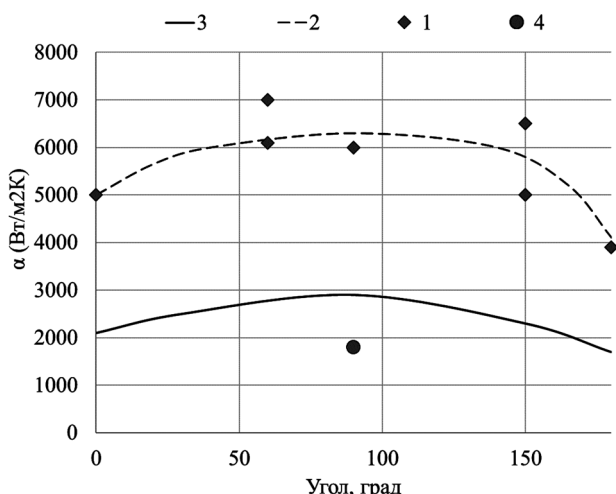


Рис. 7. Локальный коэффициент теплоотдачи при конденсации на трубе без покрытия: 1 – данные работы [14], $P = 0.1$ МПа, газосодержание 0 %; 2 – формула (1), газосодержание 0 %; 3 – формула (1), газосодержание 25 %; 4 – измеренный тепловой поток, газосодержание 25 %, $P = 0.009$ МПа

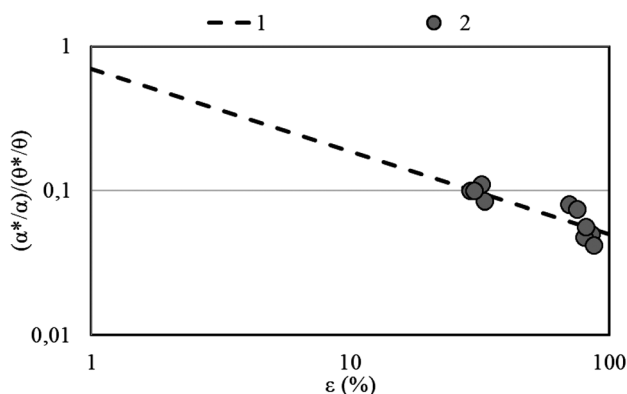


Рис. 8. Опытные данные по локальной теплоотдаче при конденсации на горизонтальной трубе с покрытием: 1 – формула (3), Θ^* – краевой угол для покрытия 90° , азимутальный угол 90° ; 2 – перепад температур $32\text{--}48$ °С, $P = 0.009\text{--}0.013$ МПа

Зависимость локального коэффициента теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с покрытием от газосодержания пред-

ставлена на рис. 8. Теплоотдача определяется комплексом, учитывающим влияние азимутального угла установки датчика и характеристик покрытия. В работе установлена зависимость локальной теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием от газосодержания. Точки при различных давлениях и температурных напорах достаточно близки, так как термическое сопротивление неконденсирующихся газов является определяющим в условиях, при которых получены данные. Локальный коэффициент теплоотдачи при конденсации на горизонтальной трубе с разработанным покрытием определяется по формуле В.П. Исаченко, усовершенствованной с учетом поправок на содержание неконденсирующихся газов и рельеф поверхности, полученных по опытным данным:

$$\frac{\alpha^*}{\alpha} = 0.747k \frac{\Theta^*}{\Theta} \epsilon^{-0.55}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при содержании неконденсирующихся газов 0 %, ϵ – газосодержание, %; Θ – максимальный краевой угол 180° ; Θ^* – краевой угол для покрытия; k – коэффициент, учитывающий влияние азимутального угла, рассчитанный по формуле

$$k = -4.410 \cdot 10^{-5} \varphi^2 + 0.0071\varphi + 0.89410 \cdot 10^{-5}, \quad (4)$$

φ – азимутальный угол установки датчика.

Выводы

Исследованы локальная и средняя теплоотдача при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным гидрофобным покрытием, состоящим из наночастиц углерода, нанесенных на поверхность с микроструктурой с характерным размером 80 мкм. Эксперименты проведены в диапазонах температурных напоров от 10 до 40 °С, концентрации неконденсирующихся газов от 20 до 80 % и давлений от 0.009 до 0.1 МПа. При измерении локальных тепловых потоков при конденсации на горизонтальной трубе использованы градиентные датчики теплового потока. Получены зависимости для осредненной и локальной теплоотдачи и установлены закономерности их изменения при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием в исследованных условиях.

Список литературы

1. **Nusselt W.** Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure. Z. VDI, Frankfurt, 60, 1916.
2. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача при кипении и конденсации. Москва; Ленинград: Мешгиз, 1952. 232 с.
3. **Лабунцов Д.А.** Обобщение теории конденсации Нуссельта на условия пространственно-неравномерного поля температур теплообменной поверхности // Труды МЭИ «Теплообмен и гидравлическое сопротивление». Вып. 63. 1965. С. 79–84.
4. **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.
5. **Комедантов 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.
6. **Solodov A.P., Isachenko V.P.** Statistical model for dropwise condensation. *High Temperature Physics*, 1967, vol. 5, no. 6, pp. 1032–1040.
7. **Rose J., Glicksman L.** Dropwise condensation – the distribution of drop size. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, no. 2, pp. 411–425.
8. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. Москва: Энергия, 1977. 240 с.
9. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscale. New York, Begell House, 2016, 630 p.
10. **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.
11. **Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V.** et al. Studying the wetting of a surface with combined structure. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 849–856.
12. Способ формирования гидрофобной текстуры на поверхности металла: пат. Российская Федерация / Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Лавриков А.В. – № 2750831; заявл. 23.11.2020; опубл. 05.07.2021. Бюл. № 19.
13. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Основы градиентной теплотометрии. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2012. 215 с.
14. **Зайнулина Э.Р.** Градиентная теплотометрия в исследовании теплообмена при конденсации пара на наружной поверхности трубы: дисс. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. 117 с.
15. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.V.** et al. An Investigation into Film Condensation of Saturated Steam on Tube Surfaces by a Gradient Heatmetry. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, iss. 10, pp. 794–801. URL: <https://doi.org/10.1134/S004060152109007X>
16. Способ формирования комбинированной супергидрофобной структуры поверхности: пат. Российская Федерация / Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Лавриков А.В., Иванов Н.С. – № 2769107; заявл. 17.06.2021; опубл. 28.03.2022. Бюл. № 10.

References

1. **Nusselt W.** Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure. Z. VDI, Frankfurt, 60, 1916.
2. **Kutateladze S.S.** Teploperedacha pri kipenii i kondensacii [Heat transfer during boiling and condensation]. Moscow; Leningrad, Meshgiz, 1952, 232 p.
3. **Labuncov D.A.** Obobshchenie teorii kondensacii Nussel'ta na usloviya prostranstvenno-neravnornernogo polya temperatur teploobmennoj poverhnosti. Trudy MEI "Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie", 1965, iss. 63, pp. 79–84.
4. **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.
5. **Komendantov A.S., Kovalev S.A., Petukhov B.S.** "Experimental study of heat transfer during condensation of nitrogen tetroxide vapor, which has partially passed the second stage of dissociation". *High Temperature*, 1971, vol. 9, no. 1, pp. 184–187.
6. **Solodov A.P., Isachenko V.P.** Statistical model for dropwise condensation. *High Temperature Physics*, 1967, vol. 5, no. 6, pp. 1032.
7. **Rose J., Glicksman L.** Dropwise condensation – the distribution of drop size. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, no. 2, pp. 411–425.
8. **Isachenko V.P.** Teploobmen pri kondensacii. Moscow, Energiya, 1977, 240 p.
9. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscale, New York, Begell House, 2016.
10. **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.
11. **Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V.** et al. Studying the wetting of a surface with combined structure. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 849–856.
12. **Kuzma-Kichta Yu.A., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V.** et al. Sposob formirovaniya gidrofobnoj tekstury na poverhnosti metalla [Method for forming a hydrophobic texture on a metal surface]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2750831 (2021).
13. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V.** Osnovy gradientnoj teplometrii [Fundamentals of gradient thermometry]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta, 2012, 215 p.
14. **Zajnulina E.R.** Gradientnaya teplometriya v issledovanii teploobmena pri kondensacii para na naruzhnoj poverhnosti truby. Ph. D. Thesis. Saint Petersburg, 2019, 117 p.

15. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y. Mityakov A.V. et al. An Investigation into Film Condensation of Saturated Steam on Tube Surfaces by a Gradient Heatmetry. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, pp. 794–801. URL: <https://doi.org/10.1134/S004060152109007X>
16. Kuzma-Kichta Yu.A., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V., Ivanov N.S. Sposob formirovaniya kombinirovannoj supergidrofobnoj struktury poverhnosti [Method for forming a combined superhydrophobic surface structure]. Patent Rossiiskaia Federatsiia. no. 2769107 (2022).

Статья поступила в редакцию 14.10.2022; одобрена после рецензирования 27.10.2022; принята к публикации 10.11.2022.

The article was submitted on 14.10.2022; approved after reviewing on 27.10.2022; accepted for publication on 10.11.2022.