

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 2. С. 72–78
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 72–78

Научная статья
УДК 532.64; 621.175
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-72-78

Исследование смачивания и конденсации на горизонтальной трубе с покрытием

Ю.А. Кузма-Кичта¹✉, Н.С. Иванов¹, Д.В. Чугунков¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*
kuzma@if.mpei.ac.ru✉

Аннотация. В работе исследовано смачивание поверхности с микро- и нанорельефом. Измерены краевые углы для рельефов поверхности, полученных пескоструйной обработкой, прокаткой, химической полировкой, микродуговым оксидированием и формированием с помощью частиц углерода. Представлена технология формирования поверхности с высокими гидрофобными свойствами, описано получение рельефа такой поверхности. Предложен способ формирования гидрофобной поверхности, включающий нанесение микрорельефа с помощью обработки абразивным песком и пасты из наночастиц углерода. Разработанный способ гидрофобизации поверхности позволяет достичь краевого угла 155 градусов. Для достижения супергидрофобного эффекта необходимо комбинировать микрорельеф поверхности, слой наночастиц и тонкую пленку гидрофобизатора. Эффект гидрофобизации для трубы с разработанным покрытием сохранялся в течении трех месяцев. Проведены опыты по конденсации водяного пара на горизонтальной трубе с разработанным покрытием.

Получены данные по теплоотдаче при конденсации водяного пара на медной трубе с разработанным покрытием. Показано, что разработанное покрытие увеличивает КТО в два раза в следующих условиях: температурный напор от 10 до 40 градусов, газосодержание от 20 до 80 %, давление от 0.009 до 0.1 МПа. Повышение теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием воспроизводилось в течении одного месяца в исследованных условиях.

Ключевые слова: смачивание, краевой угол, наночастицы, гидрофобность, гидрофильность

Для цитирования: Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В. Исследование смачивания и конденсации на горизонтальной трубе с покрытием // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 2. С. 72–78. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-72-78

Original article

Wetting and condensation studying on the horizontal pipe with coating

Yu.A. Kuzma-Kichta¹✉, N.S. Ivanov¹, D.V. Chugunkov¹

¹ *National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia*
kuzma@if.mpei.ac.ru✉

Abstract. The presented work studies wetting of the surface with micro- and nano-relief. The contact angles for the surface reliefs obtained by sandblasting processing, rolling, chemical polishing, micro-arc oxidation and shaping with the carbon particles were measured. The article presents a technology for a surface with high hydrophobic properties forming, and describes such surface relief obtaining. A technique for the hydro-

phobic surface shaping, including micro-relief deposition by processing with abrasive sand and a paste from the carbon nanoparticles was proposed. The developed surface hydrophobicity method allows achieving a contact angle of 155 degrees. It is necessary to combine the surface micro-relief, a nanoparticles layer and a thin film of the hydrophobisator to achieve the superhydrophobic effect. The superhydrophobic effect lasted three months for the tube with the coating developed by the authors. Experiments on the water vapor condensation on a horizontal pipe with the developed coating were conducted. Data on the heat transfer while the water vapor condensation on the copper pipe with the developed coating was obtained. The article shows that the developed coating increases the heat transfer coefficient twofold under the following conditions: the temperature difference of 10 to 40 degrees, gas content of 20 to 80 % and pressure of 0,009 to 0,1 MPa. The heat transfer coefficient increase while condensation on the tube with the developed coating was being reproduced within one month under the studied conditions.

Keywords: wetting, contact angle, nanoparticles, hydrophobicity, hydrophilicity

For citation. Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V. Wetting and condensation studying on the horizontal pipe with coating. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 72–78. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-72-78

Введение

Сверхгидрофобные покрытия обеспечивают краевой угол больше 130° . Лист лотоса имеет сверхгидрофобное покрытие, рельеф которого образован микро- и нановыступами с тонкой пленкой гидрофобизатора. Однако пленки гидрофобизаторов в случае гладких подложек изменяют смачивание поверхности незначительно, поэтому для достижения большего эффекта, необходимы не только гидрофобизаторы, в основе которых обычно выступают электроотрицательные элементы, такие как фтор, но и определенный рельеф поверхности.

Известные методы формирования рельефа поверхности позволяют достигнуть краевого угла до 179° [1]. Капли воды отскакивают от поверхности, что способствует снижению отложений и скорости коррозии. Гидрофобность характеризуется взаимодействием поверхности с молекулами жидкости. Вблизи гидрофобной поверхности облегчено скольжение жидкости, что актуально для конденсаторов ТЭЦ. За счет быстрого стекания капель жидкости процесс конденсации происходит интенсивнее.

Обратный эффект – улучшение смачивания поверхности достигается за счет нанесения гидрофильных покрытий. С их помощью можно улучшить транспорт жидкости в поверхностном слое [2–5].

Гидрофобность исследовал Т. Юнг [6]. Он рассмотрел силы, действующие на химически инертную каплю воды, и показал, что равновесный макроскопический краевой угол между мениском жидкости и подложкой определяется

соотношением энергии на границе среды и поверхностным натяжением. С уменьшением энергии на границе твердое тело – жидкость краевой угол возрастает.

В настоящее время гидрофобный эффект активно используют при создании водонепроницаемой одежды, для защиты автомобильных стекол и других предметов. Для применения в промышленности важны надежность и стабильность эффекта с течением времени, стоимость производства. Разрушение покрытия в конденсаторе ТЭЦ – это потери эффективности оборудования, поэтому сегодня активно исследуют покрытия и их влияние на смачивание [7–9]. В связи с этим изучают как гидрофильные [10], так и гидрофобные покрытия [11, 12]. В этом ряду выделяются структуры в виде наностолбиков, иголок и других рельефов. Однако данных о надежности в промышленных условиях недостаточно.

Цель данной работы – исследование смачивания поверхности с микро- и нанорельефом, разработка метода гидрофобизации поверхности, применимого к промышленности, и испытание выбранного метода при конденсации на горизонтальной трубе.

Технологии формирования поверхностей

Одним из простых методов формирования текстуры на поверхности металла является механическое воздействие. В настоящей работе получены образцы на подложках из меди. Структура формировалась с помощью механического воздействия – прокатки подложки.

Для прокатки использовались металлические структуры с известной шероховатостью в диапазоне от 20 до 500 мкм. После формирования поверхность промывали растворами гидроксида натрия и воды для удаления отложений.

Также были получены образцы структур с обработкой электрической дугой и химической полировкой. Для получения структур методом химической полировки была изготовлена пластина из меди размером 3×3 см. Поверхность пластины была обработана раствором щелочи, а затем дистиллированной водой для удаления отложений. Пластины закрепляли в цилиндрическом сосуде с электродами. В качестве электролита использовали раствор на основе фосфорной и серной кислоты с добавлением ПАВ, марка электролита PLS-5. На аноде закрепляли подложку. С помощью прецизионного источника тока подавалось напряжение 28 В с силой тока 3 А. Начальная температура жидкости в сосуде составляла 21 °С. В результате электрохимической реакции шероховатость поверхности меди уменьшалась вследствие выравнивания структуры поверхности.

МДО-покрытие было получено в специальном сосуде с электродами. Медную пластину опускали в раствор кислот. Катод был изготовлен в виде кольцевого электрода для равномерного распределения плотности тока в растворе. В схеме использовали лабораторный источник питания. Образец подвергали процедуре микродугового оксидирования в течение двух минут, после чего извлекали из сосуда и очищали с помощью дистиллированной воды.

В данной работе предложен метод гидрофобизации поверхности, с помощью которого можно достигнуть краевого угла до 155°. Основой метода стал способ, описанный в работах [13, 14]. Отличием этого метода является замена продавливания поверхности на пескоструйную обработку. Также вместо нанесения слоя наночастиц из газовой фазы предложено наносить смесь из наночастиц углерода, минерального масла, синтетического клея и растворителя. Микроструктуру формируют с помощью струи абразивного песка со средним размером частиц 100 мкм. Затем на поверхность наносят тонкий слой пасты. Растворитель испаряется, что приводит к закреплению наноструктуры и пленки гидрофобизатора на поверхности. Фотография поверхности показана на рис. 1.

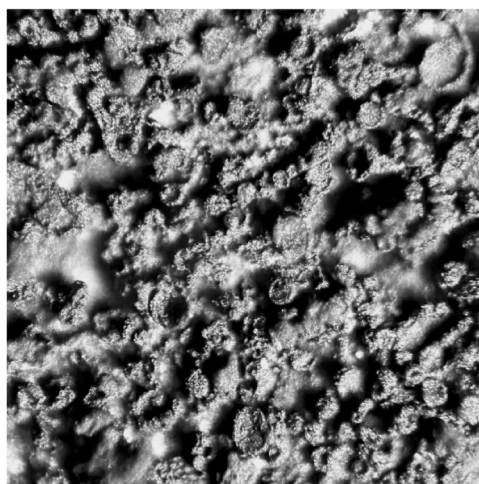


Рис. 1. Медная подложка с рельефом, полученным с помощью обработки абразивным песком и слоем наночастиц углерода с полимерной пленкой

Данные по смачиванию

В экспериментах измерялся статический краевой угол. Все измерения проводились в закрытой камере на антивибрационных подставках для исключения влияния вибраций на каплю. Образец фиксировали на горизонтально установленной чугунной плите. Эксперименты проводились при комнатной температуре (по ртутному термометру 30 градусов) и влажности 75 % (по гигрометру электронному и психрометру). Камера устанавливалась напротив центра подложки на штатив. Подача жидкости осуществлялась до формирования необходимого размера капли, затем игла удалялась. Для стабилизации капли измерение краевого угла проводилось через пять минут после нанесения в разных точках поверхности. Для обработки изображений и определения краевого угла использован цифровой транспортир с погрешностью измерения $\pm 5^\circ$. Схема измерения краевого угла показана на рис. 2.

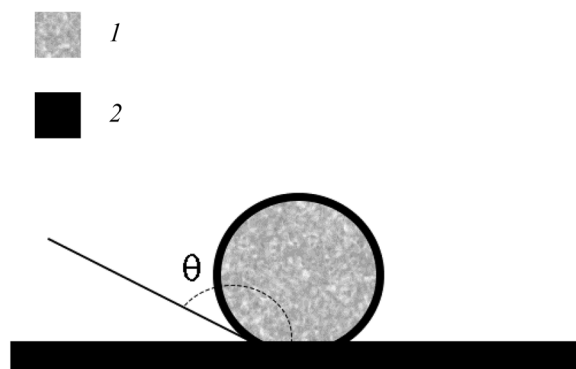


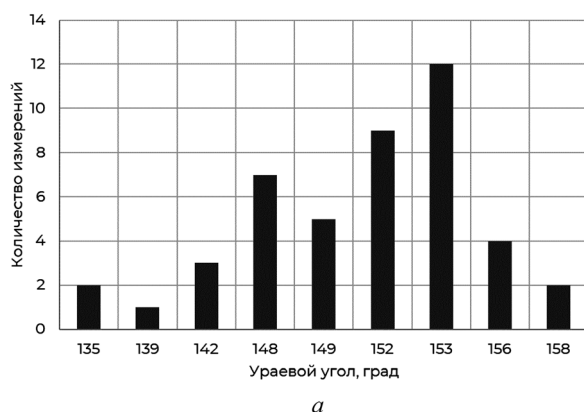
Рис. 2. Схема измерения краевого угла: 1 – жидкая фаза; 2 – твердая фаза

Данные измерений краевого угла в разных точках поверхностей, рельеф которых получен прокаткой и обработкой абразивным песком, показаны на рис. 3. Краевые углы для рассмотренных вариантов обработки поверхности отличаются не более чем на 15 %, что позволяет заменить прокатку на более простую технологию – пескоструйную обработку.

Получены также данные по смачиванию поверхностей, изготовленных прокаткой, химической полировкой, микродуговым оксидированием, обработкой абразивным песком и нанесением слоя наночастиц. Измеренные краевые углы представлены в табл. 1. Установлено, что формирование микроструктур с помощью абразивного песка с последующим нанесением слоя наночастиц приводит к росту краевого угла до 155°. Показано, что при замене прокатки на механическую абразивную обработку краевого угла практически не меняется.

Таблица 1. Смачивание исследованных поверхностей

Метод обработки поверхности	Характерный размер рельефа поверхности	Краевой угол, град
Прокатка	Диаметр впадины 400 мкм	125
Химическая полировка	Шероховатость 10 мкм	110
Микродуговое оксидирование	Шероховатость 50 мкм	98
Пескоструйная обработка	Диаметр впадины 150 мкм	127
Разработанный метод	Диаметр впадины и толщина слоя наночастиц 100 мкм; 50 нм	154



Исследована стабильность смачивания поверхности. С этой целью получены данные по изменению краевого угла с течением времени. Установлено, что в течение трех месяцев его отклонение от средней величины не превышает 10 %, что свидетельствует о сохранении гидрофобных свойств поверхности. Результаты показаны на рис. 4.

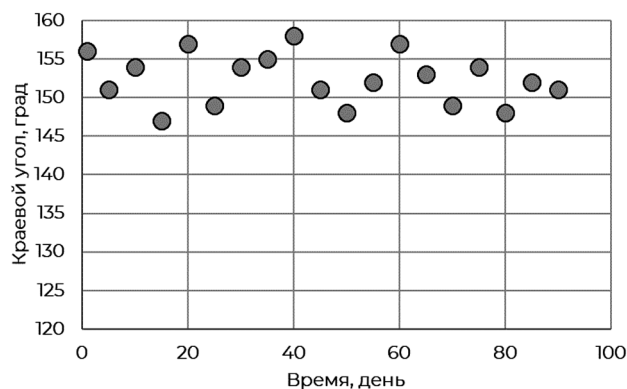


Рис. 4. Изменение краевого угла с течением времени. Подложка – медь, покрытие – микроструктура и слой наночастиц с гидрофобизатором

Данные по теплоотдаче при конденсации на трубе с разработанным покрытием

Для испытания на надежность разработанное покрытие было нанесено на медную трубу, и в течение месяца проводились измерения коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара. Опыты проведены на установке, описанной в [15], при следующих условиях: давление 0.009 атм, температурный напор 20 градусов, содержание неконденсирующихся газов 12 %.

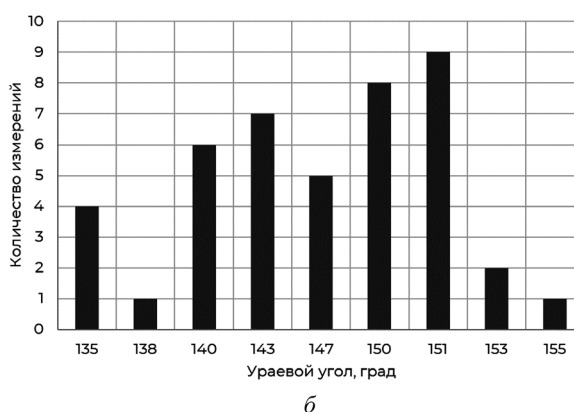


Рис. 3. Данные измерения краевых углов: а – структура, полученная с помощью прокатки, с нанесением слоя наночастиц углерода; б – структура, полученная с помощью обработки абразивным песком, с нанесением слоя наночастиц углерода

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на трубе без покрытия рассчитывался по формуле Нуссельта с учетом поправки на содержание неконденсирующихся газов.

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

где α_n – формула Нуссельта.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием рассчитывался по уравнению В.П. Исаченко с учетом поправок на содержание неконденсирующихся газов и рельеф текстуры поверхности, полученных по опытным данным

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

где α_n – коэффициент теплоотдачи при формуле В.П. Исаченко; ε – газосодержание, %; θ – максимальный краевой угол 180° ; θ^* – краевой угол для трубы с разработанным покрытием.

На рис. 5 представлены опытные данные по средней теплоотдаче на трубе с разработанным покрытием и без покрытия, зависимости Нуссельта и Исаченко с поправкой на газосодержание. С ростом давления коэффициент теплоотдачи возрастает. В области высоких температурных напоров и газосодержаний коэффициенты теплоотдачи для конденсации близки. Установлено, что труба с разработанным покрытием позволяет увеличить средний коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара в два раза.

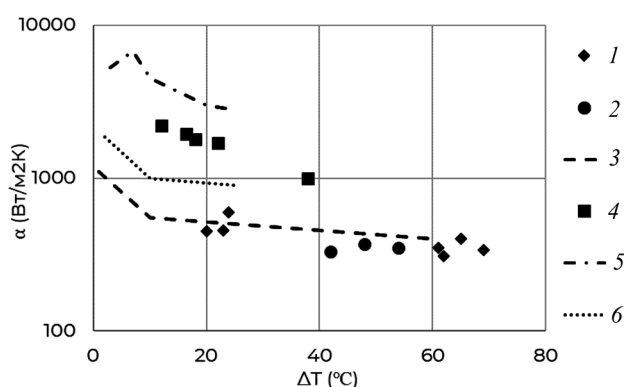


Рис. 5. Данные по теплоотдаче при конденсации на горизонтальной трубе без покрытия и с разработанным покрытием: 1 – опытные данные для трубы без покрытия, $P = 0.1$ МПа, газосодержание 60 %; 2 – опытные данные для трубы без покрытия, $P = 0.08$ МПа, газосодержание 42 %; 3 – аппроксимация данных Хендерсона, $P = 0.1$ МПа, газосодержание 60 %, [16]; 4 – труба с разработанным покрытием, газосодержание 12 %; 5 – формула В.П. Исаченко с поправкой на газосодержание 18 %; 6 – формула Нуссельта с поправкой на газосодержание

Данные по изменению коэффициента теплоотдачи с течением времени получены для трубы с покрытием и без покрытия. В течение 30 дней измеряли коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара на трубе. Измерения проводились при заданных давлении, температурном напоре и содержании неконденсирующихся газов. На рис. 6 показано изменение коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе с течением времени. Полученные результаты исследования согласуются с данными, представленными в работах [16–20].

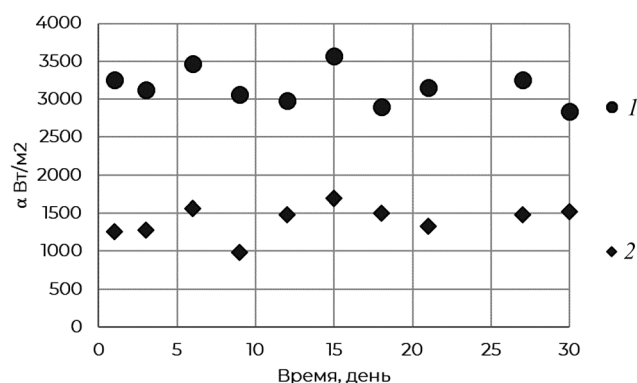


Рис. 6. Изменение среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара на трубе с покрытием (1) и без покрытия (2) при давлении 0.009 атм, температурном напоре 20 градусов и содержании неконденсирующихся газов 12 %

Заключение

Предложен способ формирования гидрофобной поверхности, включающий нанесение микрорельефа с помощью обработки абразивным песком и пасты из наночастиц углерода. Разработанный способ гидрофобизации поверхности позволяет достичь краевого угла 155° . Для получения супергидрофобного эффекта необходимо комбинировать микрорельеф поверхности, слой наночастиц и тонкую пленку гидрофобизатора. Эффект гидрофобизации для трубы с разработанным покрытием сохранялся в течение трех месяцев. Получены данные по теплоотдаче при конденсации водяного пара на трубе с покрытием. Показано, что разработанное покрытие увеличивает коэффициент теплоотдачи в два раза при следующих условиях: температурный напор от 10 до 40 градусов, газосодержание от 20 до 80 %, давление от 0.009 до 0.1 МПа. Повышение теплоотдачи при конденсации на трубе с разработанным покрытием воспроизводилось в течение одного месяца.

Список источников

- 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, 2016, 564 p.
- Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Лавриков А.В. Снижение термического сопротивления термостабилизатора с помощью нанесения в испарителе покрытия из микро- и наночастиц // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 2. С. 50–55. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-2-50-55.
- Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. et al. The influence of the drop formation rate at spreading over a microstructured surface on the contact angle. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, pp. 237–244.
- Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation. *Journal Heat Transfer*, 2001, vol. 123 (6), pp. 1071–1079.
- Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Лавриков А.В., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф. Исследование методов уменьшения термического сопротивления составного термостабилизатора // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 10. С. 447–452. DOI: 10.34759/tpt-2019-11-10-447-452
- Young T. *Philosophy Transaction Royal Society*, 1805, 95, 65 p.
- Kim D., Kim J., Hwang W. Prediction of contact angle on a microline patterned surface. *Surface Science Letters*, 2006, vol. 600, no. 22, pp. 301–304.
- Deng X., Mammen L., Butt H.J., Vollmer D. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating. *Science*, 2011, vol. 335 (6064), pp. 67–70 DOI: 10.1126/science.1207115
- Daniel J., Daniela L., Nenad M., Jing K., Evelyn N. Scalable Graphene Coatings for Enhanced Condensation Heat Transfer. *Nano Letters*, 2015, vol. 15 (5), pp. 2902–2909.
- Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Lavrikov A.V. Transport Properties of Coatings Consisting of Al₂O₃ Nanoparticles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, pp. 30–35 URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02270-4>
- 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, pp. 1549–1556.
- Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В., Лавриков А.В. Исследование смачивания поверхности с комбинированной структурой // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28. № 6. С. 893–900.
- Способ формирования комбинированной супергидрофобной структуры поверхности: пат. Российская Федерация / Кузма-Кичта Ю.А., Чугунков Д.В., Лавриков А.В., Иванов Н.С. – № 2769107; заявка 17.06.21, опубл. 28.03.22. Бюл. № 10.
- Способ формирования гидрофобной текстуры на поверхности металла: пат. Российская Федерация / Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Чугунков Д.В., Киселев А.С. – № 2750831, заявка 23.11.2020, опубл. 05.07.2021. Бюл. № 19.
- Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Лавриков А.В., Иванов Н.С., Чугунков Д.В. Интенсификация теплообмена при конденсации на трубе с наногидрофобным покрытием при высоком газосодержании // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17–22 октября 2022 г.). В 2 т. Т. 2. Москва, 2022. С. 144–145.
- Henderson C.L., Marchello J.M. Film Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas. *Journal Heat Transfer*, 1969, vol. 91(3), pp. 447–450.
- Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A. Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement. Springer, 2020, 232 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40854-1_1
- Исаченко В.П., Солодов А.П., Мальцев А.П., Якушева Е.В. Асимптотический анализ капельной конденсации // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22. Вып. 5. С. 924–932.
- Берман Л.Д., Фукс С.Н. Влияние примеси воздуха на теплоотдачу при конденсации движущегося пара // Известия Всесоюзного теплотехнического института. 1952. № 1. С. 11–18.
- Комендантов А.С., Ковалев С.А., Петухов Б.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи при конденсации пара четырехоксида азота, частично прошедшего вторую стадию диссоциации // Теплофизика высоких температур. 1971. Т. 9 (1). С. 207–209.

References

- 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, 2016, 564 p.
- Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Lavrikov A.V. et al. Snizhenie termicheskogo soprotivleniya termostabilizatora s pomoshch'yu nanoseniya v isparitele pokrytiya iz mikro- i nanochastits [Decreasing the thermal resistance of a thermal stabilizer by applying a coating of micro- and nanoparticles in an evaporator]. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 50–55. (In Russ.). DOI 10.34759/tpt-2022-14-2-50-55.
- Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V., Orlova E.G. et al. The influence of the drop formation rate at spreading over a microstructured surface on the contact angle. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, vol. 25, pp. 237–244.
- Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation. *Journal Heat Transfer*, 2001, vol. 123 (6), pp. 1071–1079.
- Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Lavrikov A.V., Shtefanov Yu.P., Prokopenko I.F. Investigation of methods for reducing the thermal resistance of a composite thermal stabilizer. *Thermal processes in engineering*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 447–452. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2019-11-10-447-452
- Young T. *Philosophy Transaction Royal Society*, 1805, 95, 65 p.
- Kim D., Kim J., Hwang W. Prediction of contact angle on a microline patterned surface. *Surface Science Letters*, 2006, vol. 600, no. 22, pp. 301–304.
- Deng X., Mammen L., Butt H.J., Vollmer D. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating. *Science*, 2011, vol. 335 (6064), pp. 67–70. DOI: 10.1126/science.1207115
- Daniel J., Daniela L., Nenad M., Jing K., Evelyn N. Scalable Graphene Coatings for Enhanced Condensation Heat Transfer. *Nano Letters*, 2015, vol. 15 (5), pp. 2902–2909.
- Kuzma-Kichta Y.A., Ivanov N.S., Lavrikov A.V. Transport Properties of Coatings Consisting of Al₂O₃ Nanoparticles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021, vol. 94, pp. 30–35 URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02270-4>

11. **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, pp. 1549–1556.
12. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V.** Issledovanie smachivaniya poverkhnosti s kombinirovannoi strukturoi [Investigation of the wetting of a surface with a combined structure]. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2021, vol. 28, no. 6, pp. 893–900. (In Russ.)
13. **Kuzma-Kichta Yu.A., Chugunkov D.V., Lavrikov A.V., Ivanov N.S.** Sposob formirovaniya kombinirovannoi supergidrofobnoi struktury poverkhnosti [Method of forming a combined superhydrophobic surface structure]. Patent Rossiiskaya Federatsiya no. 2769107 (2022).
14. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ivanov N.S., Chugunkov D.V., Kiselev A.S.** Sposob formirovaniya gidrofobnoi tekstury na poverkhnosti metalla [Method of forming a hydrophobic texture on a metal surface]. Patent Rossiiskaya Federatsiya no. 2750831 (2021).
15. **Kuzma-Kichta Yu.A., Komendantov A.S., Lavrikov A.V., Ivanov N.S., Chugunkov D.V.** Intensifikatsiya teploobmena pri kondensatsii na trube s nanogidrofobnym pokrytiem pri vysokom gazosoderzhanii [Intensification of heat transfer during condensation on a pipe with a nanohydrophobic coating at high gas content]. *Materialy Vos'moi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu [Proceedings of the Eighth Russian National Conference on Heat Transfer (Moscow, October 17–22, 2022)]*. 2 vols. Vol. 2. Moscow, 2022, pp. 144–145. (In Russ.)
16. **Henderson C.L., Marchello J.M.** Film Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas. *Journal Heat Transfer*, 1969, vol. 91(3), pp. 447–450.
17. **Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Mityakov A.** Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement. Springer, 2020, 232 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40854-1_1
18. **Isachenko V.P., Solodov A.P., Maltsev A.P., Yakusheva E.V.** Asimptoticheskii analiz kapel'noi kondensatsii [Asymptotic Analysis of Drop Condensation]. *High temperatures*, 1984, vol. 22, iss. 5, pp. 924–932. (In Russ.)
19. **Berman L.D., Fuchs S.N.** Vliyanie primesi vozdukh na teplootdachu pri kondensatsii dvizhushchegosya para [Influence of air admixture on heat transfer during condensation of moving steam]. *Izvestiya VTI*, 1952, no. 1. pp. 11–18. (In Russ.)
20. **Komendantov A.S., Kovalev S.A., Petukhov B.S.** Eksperimental'noe issledovanie teplootdachi pri kondensatsii para chetyrehkoksii azota, chastichno proshedshego vtoruyu stadiyu dissotsiatsii [Experimental study of heat transfer during condensation of nitrogen tetroxide vapor that has partially passed through the second stage of dissociation]. *High Temperature*. 1971, vol. 9 (1), pp. 207–209. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 25.01.2023; принята к публикации 14.02.2023.

The article was submitted on 14.11.2022; approved after reviewing on 25.01.2023; accepted for publication on 14.02.2023.