

Стекание капель воды с текстурированной поверхности металла

Ксения Артуровна Войткова[✉], Жанна Андреевна Косторева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
Контакт для переписки: bka1801@mail.ru[✉]

Аннотация. Технологии улавливания жидкости из паровоздушной смеси в виде капель малого объема с помощью расположенных под определенным углом решеток или металлических пластин применяются во многих промышленных установках. Проведение экспериментальных исследований процессов соударения и стекания капель жидкости по поверхностям металла является актуальным для повышения эффективности сбора жидкости из паровоздушной смеси в промышленных установках. Соответственно, цель настоящей работы заключалась в анализе влияния текстуры поверхности металла на характеристики процесса растекания капель воды после их падения.

Эксперименты проводились на установке, основанной на теневой методике. Варьировались высота сброса капель жидкости и угол наклона подложки. Для оценки влияния текстуры на характеристики процесса растекания капель воды на поверхности подложек из латуни шлифовальной машиной были нанесены микроканавки. После дозирования на обработанную шлифовкой поверхность подложки капли вытягивались вдоль канавок. Левый и правый контактные углы, измеренные перпендикулярно канавкам, увеличились на 15% в сравнении с углами, измеренными на полированной поверхности подложки. Выявлено, что после пиннинга капли на наклоненной поверхности разница между левыми контактными углами, измеренными параллельно и перпендикулярно канавкам, составила более 35%.

Ключевые слова: капля, растекание, текстура, поверхность металла, контактный угол, угол скатывания, контактный диаметр

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00641, <https://rscf.ru/project/23-29-00641/>).

Цитирование: Войткова К. А., Косторева Ж. А. 2023. Стекание капель воды с текстурированной поверхности металла // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 3 (35). С. 117–131. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-117-131>

Поступила 24.03.2023; одобрена 15.08.2023; принята 06.10.2023

Sliding of water droplets onto a textured metal surface

Kseniya A. Voytkova , Zhanna A. Kostoreva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Corresponding author: bka1801@mail.ru 

Abstract. Technologies for catching fluid from a steam mixture in the form of small droplets using the lattices or metal plates located at a certain angle are used in many industrial installations. Conducting experimental studies of the processes of collision and draining the drops of fluid on the surfaces of the metal is relevant for increasing the efficiency of gathering fluid from the steam-air mixture in industrial plants. Accordingly, the purpose of this work was to analyze the effect of the texture of the metal surface on the characteristics of the process of spreading water drops after their fall.

The experiments were carried out at the setup, which is based on the shadow technique. The height of liquid droplets and the angle of the substrate inclination were varied. To assess the effect of texture on the characteristics of the spreading of water drops on the surface of brass substrates, microgrooves were applied by a grinder. It was found out that after dosing, the drop stretched along the grooves. The left and right contact angles (LCAs and RCAs), measured perpendicular to the grooves, increased by 15% compared to the angles measured on the polished surface of the substrate. It was established that after pinning the drops on the tilted surface, the difference between the LCAs, measured in parallel and perpendicular to the grooves, increased by more than 35%.

Keywords: droplet, spreading, texture, metal surface, contact angle, roll-off angle, contact diameter

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-29-00641, <https://rscf.ru/project/23-29-00641/>).

Citation: Voytkova, K. A., & Kostoreva, Zh. A. (2023). Sliding of water droplets onto a textured metal surface. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(3), 117–131. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-117-131>

Received March 24, 2023; Reviewed August 15, 2023; Accepted October 6, 2023

Введение

Технологии улавливания жидкости из паровоздушной смеси в виде капель малого объема (порядка нескольких микролитров) с помощью расположенных под определенным углом решеток или металлических пластин используются во многих промышленных установках [Ну и др., 2021; Chen и др., 2022; Ну и др., 2023], таких как скрубберы [Jingjing и др., 2013],

градирни [Shublaq, Sleiti, 2020; Nugent и др., 2022], ректификационные колонны [Duan, Li, 2022; Yu, Chien, 2023], спреевые системы охлаждения [Fu и др., 2022; Hu, Guo, 2022; Shi и др., 2022] и др. В частности, в теплоэнергетике для сбора воды из воздушно-капельной смеси используют градирни с каплеуловителями [Lucas и др., 2009; Емельяненко и др., 2019]. Жидкость стекает в специальные коллекторы и возвращается обратно в контур. С целью уменьшения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на промышленных предприятиях используются скрубберы для очистки газов. В скрубберах частички пыли смачиваются каплями жидкости и слипаются между собой с увеличением массы [Yilbas и др., 2021]. Относительно крупные капли воды с частичками улавливаются и удаляются дренажной системой [Raman и др., 2015].

Эффективность таких технологий зависит от адгезии, режимов испарения капли, скорости растекания и других характеристик взаимодействия жидкости с поверхностью металла. Исследователи отмечают, что на геометрические характеристики капель жидкости (контактный угол, контактный диаметр) и угол скатывания (угол наклона) по твердой поверхности влияют не только параметры капель (их размер) [Wang и др., 2020], но также и температура [Bernardin и др., 1997; Liang, Mudawar, 2017], шероховатость (текстура) [Bernardin и др., 1997; Cunha и др., 2013; Liang, Mudawar, 2017] и свойства смачиваемости поверхности металла [Cunha и др., 2013; Wörner и др., 2021].

Так, например, в работе [Cai и др., 2022] поверхность подложки обрабатывалась фемтосекундным лазерным излучением. После обработки на поверхности образовалась текстура в виде параллельных линий. Угол скатывания капель воды составил 17 и 27,4° в двух противоположных направлениях соответственно [Cai и др., 2022].

Кроме того, одним из влияющих факторов называют также [Bernardin и др., 1997; Liang, Mudawar, 2017] число Вебера (We) (1):

$$We = \frac{\rho D_0 U_0^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; D_0 — диаметр капли, м; U_0 — скорость капли, м/с; σ — поверхностное натяжение жидкости, мН/м.

Отсутствие к настоящему времени полномасштабной теории, позволяющей провести прогностическое моделирование процесса взаимодействия капель жидкости с твердой поверхностью, значительно усложняет усовершенствование существующих и создание новых технологий улавливания капель различного назначения. При этом выбор наиболее эффективных технологических режимов без полного понимания физики процессов соударения и стекания капель с твердых поверхностей с различными характеристиками и без надежных прогностических моделей практически невозможен. В связи с этим целью настоящей работы являлся анализ влияния текстуры поверхности металла на характеристики процесса растекания капель воды после их падения.

Методы

Эксперименты проводились на установке (рис. 1), работа которой основана на теневом методе [Zaitsev и др., 2020]. Капли дистиллированной воды объемом 5 ± 1 мкл выдавливались

через тонкую иглу ($d = 0,3$ мм) с ровным срезом и сбрасывались на поверхность подложки с помощью инфузионного шприцевого насоса Mindray BeneFusion SP3 (Mindray, Китай). Расстояние между концом иглы шприца и поверхностью подложки изменялось от 20 до 200 мм. Числа Вебера (We) варьировались от 17 до 66. Угол наклона подложки регулировался поворотным механизмом от 0 до 70°.

Процесс растекания капель воды по поверхности подложки регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры Evercam 1000-4-M («Промышленная оптика», Россия) с частотой съемки 1 000 кадров в секунду и разрешением $1\,280 \times 800$ пикселей и объектива Canon EF 200mm f/2.8L II USM (Canon, Япония). Для оценки достоверности полученных экспериментальных данных рассчитывались погрешности измерений регистрируемых физических величин. Каждый эксперимент повторялся не менее 10 раз. Погрешности измерений геометрических характеристик капель воды на поверхностях подложек не превышали 10%.

Экспериментальные исследования процесса растекания капель воды проведены на подложках из латуни марки ЛС59-1 (химический состав по [ГОСТ 15527—2004]). На поверхность подложки однонаправленными движениями ленточной шлифовальной машины были нанесены параллельные микроканавки. Шлифовальная лента представляла собой хлопчатобумажную шкурку с абразивными частицами электрокорунда (не более 28 мкм по [ГОСТ 3647—80]) на клеевой основе. Подложки после обработки очищали в ультразвуковой ванне ODA-M07 («ОДА-Сервис», Россия) для удаления частиц абразивных материалов и органических веществ с их поверхностей в течение трех минут. Использовались специальная промывочная жидкость для ультразвуковых ванн Solins FA+ и дистиллированная вода. Характеристики шероховатости были измерены с помощью профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210 (Mitutoyo, Япония).

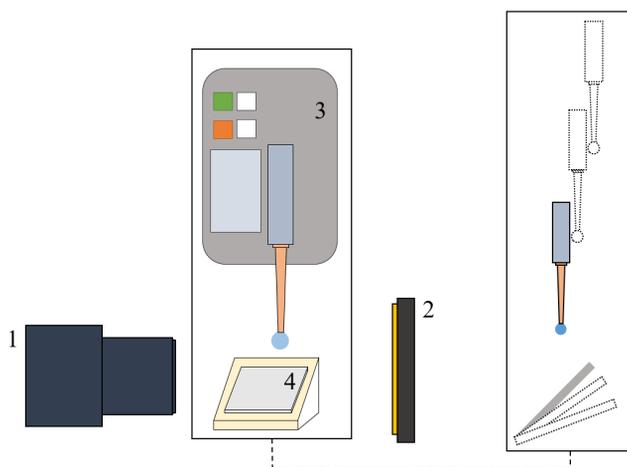


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — видеокамера, 2 — источник света, 3 — шприцевой насос, 4 — подложка

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 — video camera, 2 — light source, 3 — syringe pump, 4 — substrate

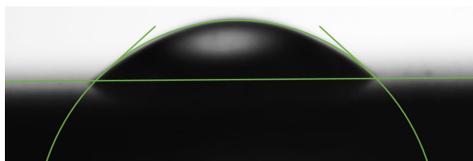


Рис. 2. Типичное фотоизображение капли на поверхности латуни в программном комплексе Drop Shape Analysis (версия 1.92, 2009 г.)

Fig. 2. A typical photo image of a droplet on the brass in the Drop Shape Analysis software (version 1.92, 2009)

Для определения свойств смачиваемости на полированную и текстурированную поверхность подложек наносились с помощью дозатора «Ленпипет» (Thermo Fisher Scientific) капли воды объемом $5 \pm 0,01$ мкл. Контактные углы капель воды определялись с помощью программного комплекса Drop Shape Analysis (версия 1.92, 2009 г., Krüss, Германия) методом Tangent Method-1 через 10 сек после дозирования капли (рис. 2). Систематические погрешности метода не превышали 5%. Угол скатывания капли воды регистрировался после наклона подложки с помощью поворотного механизма.

Эксперименты с каплями проведены в воздушной среде при атмосферном давлении. Температура капель воды и поверхности подложки соответствовала температуре воздуха в помещении лаборатории 298 ± 1 К. Относительная влажность воздуха составляла $35 \pm 5\%$.

Результаты и обсуждение

Характеристика поверхности латуни

После обработки подложки шлифовальным инструментом на ее поверхности образовались параллельные царапины (рис. 3), глубина и ширина которых не превышали 28 мкм (в соответствии с предельным размером абразивных частиц по [ГОСТ 3647—80]). Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности и углы скатывания представлены в таблице 1. Перпендикулярно канавкам угол скатывания не зарегистрирован. При наклоне подложки параллельно канавкам угол скатывания составил 70° , что соответствует углу скатывания, зарегистрированному на полированной подложке.

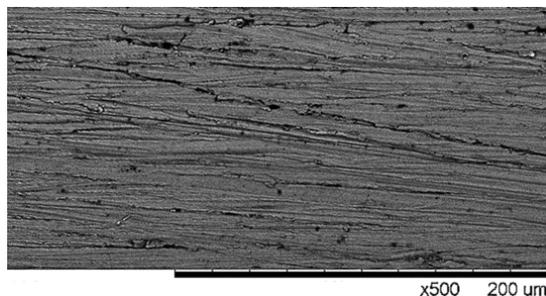


Рис. 3. Фотоизображение микроструктуры поверхности латуни

Fig. 3. SEM image of the brass surface

Таблица 1. Характеристики поверхности подложки
Table 1. Surface characteristics

Поверхность подложки	ПКУ, °	ЛКУ, °	Угол скатывания, °	Ra, μm
Полированная	73,9	72,1	70	0,05
С канавками, расположенными параллельно вектору движения капли	76,2	76,1	70	0,25
С канавками, расположенными перпендикулярно вектору движения капли	84,7	84,8	—	0,31

После дозирования на обработанную шлифовкой поверхность подложки капли вытягивались вдоль канавок. Левый и правый контактные углы (ЛКУ и ПКУ), измеренные перпендикулярно канавкам, увеличились на 15% в сравнении с углами, измеренными на полированной поверхности подложки. ЛКУ и ПКУ, измеренные параллельно канавкам, увеличились менее чем на 5% (в пределах погрешности измерений).

Проведено сравнение угла скатывания капель воды с поверхностями подложек с другим типом шероховатости. Для этого были выбраны результаты экспериментов, полученные на гидрофильных поверхностях подложек из двух металлов: алюминий-магниевого сплава марки АМг6 с текстурой в виде системы кратеров, образованных импульсным лазерным излучением [Kuznetsov и др., 2019], и деформируемого сплава алюминия марки АД1Н с неупорядоченной текстурой [Кошевар и др., 2019]. Установлено, что на данных поверхностях подложек углы скатывания не зарегистрированы, так же как и на поверхности латуни, перпендикулярной канавкам. Кроме того, рассмотрен процесс растекания капли воды по обработанной лазерным излучением гидрофобной поверхности подложки из меди с текстурой в виде параллельных канавок. Выявлено, что угол скатывания капель воды уменьшился с 27,4 до 17° при его измерении перпендикулярно канавкам и параллельно канавкам соответственно [Cai и др., 2022].

Падение капель воды на наклоненные подложки из латуни

В промышленных аппаратах капли жидкости ударяются о поверхности металлических пластин и стекают под действием силы тяжести, а не наносятся на поверхность с помощью дозирующего устройства. В этом случае на взаимодействие капли с твердой поверхностью существенное влияние оказывает сила инерции. На рис. 4 представлены типичные фотоизображения капли воды, растекающейся по наклоненной на 45° поверхности латуни, в разные моменты времени (t , с).

После удара о поверхность подложки жидкость растекалась, образуя пленку до максимального контактного диаметра (рис. 4б). Затем под действием силы тяжести образовывался шаровой снаряд (рис. 4в). При этом под действием силы поверхностного натяжения жидкость собиралась в каплю (рис. 4д). После уравнивания сил, действующих на каплю, регистрировался пиннинг ее контактной линии. В результате изменения расстояний, на которые смещались капли после падения на поверхность латуни, обнаружено, что ось симметрии капли смещается только на величину, равную половине максимального диаметра ее растекания.

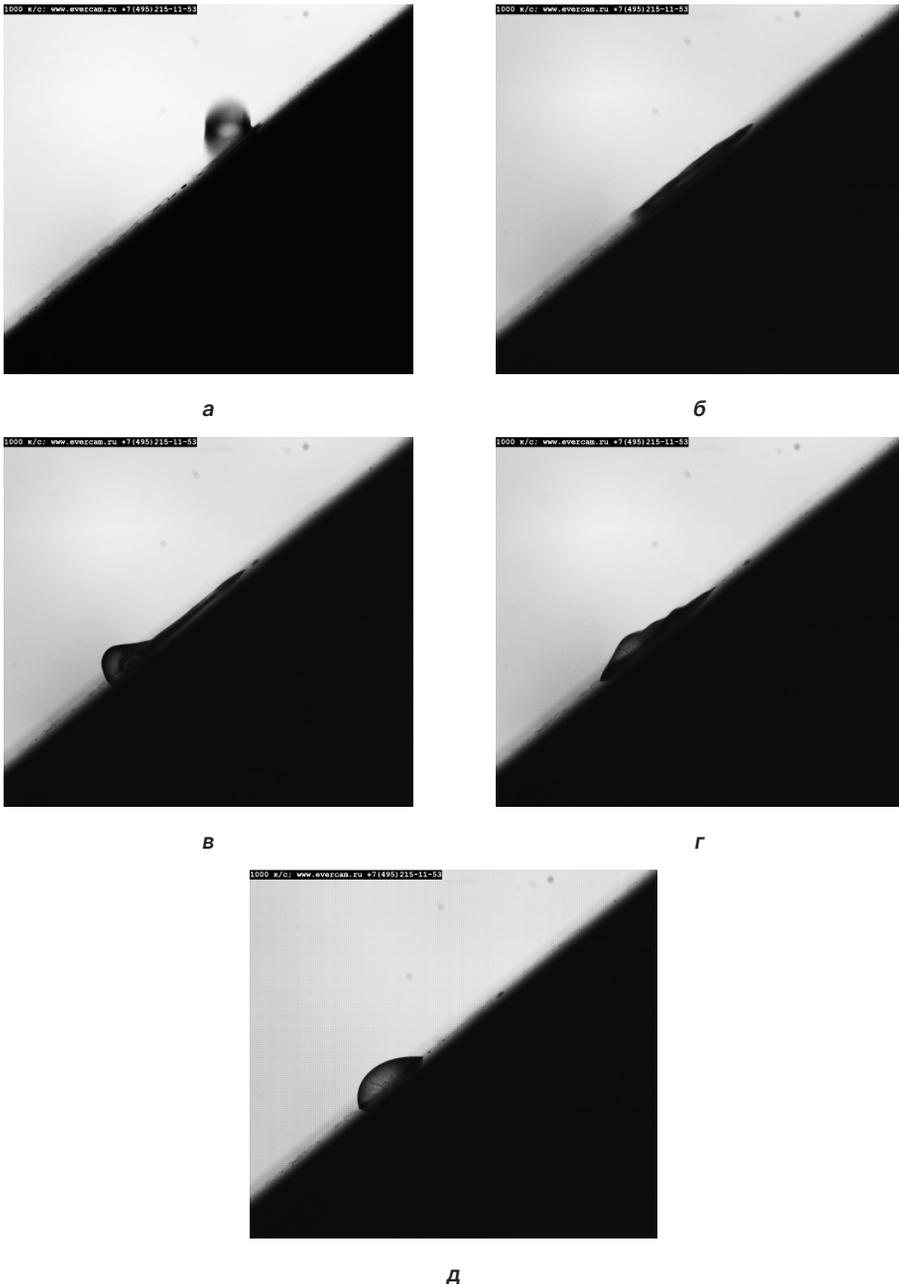


Рис. 4. Типичные фотоизображения капли воды, растекающейся по наклоненной поверхности латуни. Время (t , с): а — 0; б — 0,003; в — 0,013; г — 0,023; д — 0,1. Высота сброса капли 150 мм, угол наклона подложки 45°

Fig. 4. Typical photo images of the water droplet on the tilted brass surface. Time (t , s): а — 0; б — 0,003; в — 0,013; г — 0,023; д — 0,1. The height of falling is 150 mm, the tilt angle of the substrate is 45°

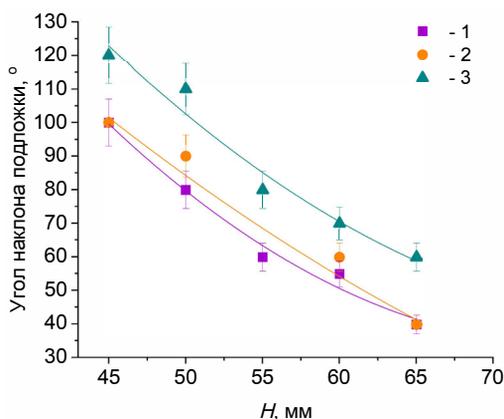


Рис. 5. Зависимости угла наклона подложки от высоты сброса жидкости, при которых зарегистрирован пиннинг капли на поверхности латуни: 1 — с канавками, расположенными перпендикулярно вектору движения капли; 2 — с канавками, расположенными параллельно вектору движения капли; 3 — полированной

Fig. 5. Depending on the tilt angle of the substrate on the height of the fluid discharge in which the pinning of the drops on the surface were registered: 1 — with grooves located perpendicular to the movement vector of the drop; 2 — with grooves located parallel to the movement vector of the drop; 3 — polished

Получены зависимости угла наклона подложки от высоты сброса жидкости, при которых зарегистрирован пиннинг капли на поверхности латуни (рис. 5).

На рис. 5 показано, что обработка поверхности латуни шлифовальной машиной влияет на характеристики (угол наклона подложки и высоту сброса капли), при которых наступает пиннинг контактной линии капли после ее падения. После обработки поверхности вероятность пиннинга контактной линии капли увеличивается на 20% в сравнении с полированной поверхностью подложки. Стоит отметить, что направление канавок не влияет на углы наклона подложки и высоты сброса жидкости, при которых наступает пиннинг контактной линии капли после ее падения. Дело в том, что, в отличие от способов прецизионной обработки поверхностей металлов с образованием текстуры в форме параллельных канавок с заданными глубиной, шириной и расстоянием между соседними линиями (например, литография, 3D-печать, лазерная обработка), после механической обработки латуни шлифовальной машиной размеры канавок могли варьироваться в зависимости от соприкосновения металла с абразивными частицами. Грубые края канавок уменьшали скольжение капли даже в параллельном канавкам направлении.

Геометрические характеристики капли воды после падения на наклоненную подложку из латуни

Результаты анализа типичных зависимостей ЛКУ и ПКУ от времени растекания капель воды по расположенным под углом 45° поверхностям подложек из латуни показывают (рис. 6), что направление канавок оказывает существенное влияние на ЛКУ.

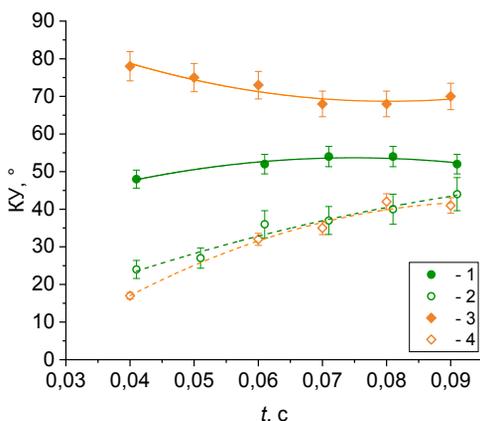


Рис. 6. Типичные зависимости контактных углов капли воды от времени растекания по поверхности латуни: с канавками, расположенными параллельно вектору движения капли (1 — ЛКУ, 2 — ПКУ); с канавками, расположенными перпендикулярно вектору движения капли (3 — ЛКУ, 4 — ПКУ). Высота сброса капли 150 мм, угол наклона подложки 45°

Fig. 6. Typical dependences of the contact angles of the drop of water from the time of spreading on the surface of the brass: with grooves located parallel to the movement vector of the drop (1 — LCA, 2 — RCA); with grooves located perpendicular to the movement vector of the drop (3 — LCA, 4 — RCA). The height of falling is 150 mm, the tilt angle of the substrate is 45°

После пиннинга капли на наклоненной поверхности разница между ЛКУ, измеренными параллельно и перпендикулярно канавкам, составила более 35%. После падения капли воды на поверхность латуни, наклоненную перпендикулярно канавкам, наличие последних препятствовало растеканию капли, но под действием силы тяжести жидкость перемещалась вниз. ЛКУ увеличивался при постоянном контактном диаметре (рис. 6, линия 2). При растекании капли в параллельном канавкам направлении ЛКУ уменьшался с увеличением контактного диаметра капли (рис. 6, линия 1), жидкость стекала по канавкам. Направление канавок не оказывало такого влияния на ПКУ (рис. 6), как в случае с ЛКУ.

По результатам анализа зависимостей контактного диаметра от времени растекания капель воды по расположенным под углом поверхностям подложек установлено (рис. 7), что направление канавок влияет на контактный диаметр капли. После падения на поверхность подложки капля растекается до максимального диаметра. Максимальный диаметр капли на поверхности подложки с перпендикулярными канавками меньше максимального диаметра капли на поверхности подложки с параллельными канавками на 7%. После достижения максимального контактного диаметра жидкость собиралась в каплю под действием силы поверхностного натяжения. Контактный диаметр, зарегистрированный после уравнивания действующих на каплю сил, на поверхности подложки с перпендикулярными канавками больше контактного диаметра капли на поверхности подложки с параллельными канавками на 5%. Канавки, направленные перпендикулярно наклону подложки, являлись барьерами при движении контактной линии капли и препятствовали собиранию капли.

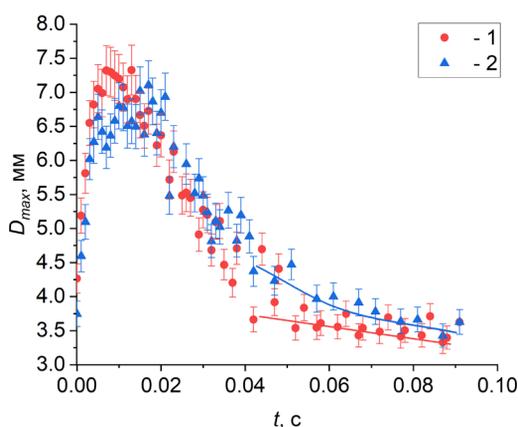


Рис. 7. Типичные зависимости контактного диаметра капли воды от времени растекания по поверхности латуни: 1 — с канавками, расположенными параллельно вектору движения капли; 2 — с канавками, расположенными перпендикулярно вектору движения капли. Высота сброса капли 150 мм, угол наклона подложки 45°

Fig. 7. Typical dependences of the contact diameter of the drop of water on the time of spreading on the surface of the brass: 1 — with grooves located parallel to the movement vector of the drop; 2 — with grooves located perpendicular to the movement vector of the drop. The height of falling is 150 mm, the tilt angle of the substrate is 45°

Заклучение

Проведен анализ влияния текстуры поверхности металла на характеристики процесса растекания капель воды после их падения. Подложки из латуни обрабатывались односторонними движениями шлифовальной машины. После обработки подложки на ее поверхности образовались параллельные канавки, глубина и ширина которых не превышали характерного размера абразивных частиц. Проведенные исследования показали возможность изменения свойств смачиваемости латуни относительно простой механической обработкой шлифовальной машиной.

После обработки поверхности вероятность пиннинга контактной линии капли увеличивается на 20% в сравнении с полированной поверхностью подложки. Обработка латуни влияет на углы скатывания капли в направлении, перпендикулярном канавкам: капли воды не скатывались с поверхности латуни даже при наклоне подложки на 90° . После дозирования на обработанную шлифовкой поверхность подложки капли вытягивались вдоль канавок. ЛКУ и ПКУ, измеренные перпендикулярно канавкам, увеличились на 15% в сравнении с углами, измеренными на полированной поверхности подложки. ЛКУ и ПКУ, измеренные параллельно канавкам, увеличились менее чем на 5%.

Проведены эксперименты по исследованию растекания капли воды после падения с высоты 150 мм на наклоненную под углом 45° поверхность подложки. Результаты показали, что после пиннинга капли на наклоненной поверхности разница между ЛКУ, измеренными параллельно и перпендикулярно канавкам, составила более 35%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 3647—80. 2004. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов. 17 с.
- ГОСТ 15527—2004. 2004. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. М.: Изд-во стандартов. 7 с.
- Емельяненко К. А., Мельников С. Н., Прошин П. И., Домантовский А. Г., Емельяненко А. М., Бойнович Л. Б. 2019. Текстурированные материалы с экстремальным смачиванием для сбора воды из аэрозолей // Доклады Академии наук. Том 489. № 5. С. 478–482. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524895478-482>
- Кошевар В. Д., Кажуро И. П., Шкадрцова В. Г., Письменская А. С. 2019. Смачивание изотропных микротекстур, сформированных на поверхности стекла и алюминия // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. Том 55. № 3. С. 309–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317>
- Bernardin J. D., Stebbins C. J., Mudawar I. 1997. Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 40. No. 2. Pp. 247–267. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00119-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00119-6)
- Cai Z., Chen F., Tian Y., Zhang D., Lian Z., Cao M. 2022. Programmable droplet transport on multi-bioinspired slippery surface with tridirectionally anisotropic wettability // Chemical Engineering Journal. Vol. 449. Article 137831. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137831>
- Chen B., Zhang Y., Dai Z., Wang C., Zhang X. 2022. Experimental research on the dynamics of a train of droplets impacting, from droplets to liquid film, continuity and inheritance // Energy. Vol. 256. Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124670>
- Cunha A., Serro A. P., Oliveira V., Almeida A., Vilar R., Durrieu M.-C. 2013. Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti–6Al–4V surfaces // Applied Surface Science. Vol. 265. Pp. 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.085>
- Duan C., Li C. 2022. Process improvement for three-column extractive distillation by feed split // Separation and Purification Technology. Vol. 297. Article 121467. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121467>
- Fu H., Zhao R., Long W., Cheng W. 2022. Study on cooling performance of rapid cooling system based on vacuum spray flash evaporation // Applied Thermal Engineering. Vol. 201. Article 117751. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117751>
- Hu B., Guo J. 2022. Effect of cooling water flow on heat transfer performance of horizontal tube spray falling film evaporator in ORC system // Energy Reports. Vol. 8. Pp. 540–545. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2022.10.185>
- Hu F., Lu Y., Wu F., Ming Y., Xia G., Zhang H. 2021. Breakup and collision of water droplet for mass injection pre-compression cooling // Aerospace Science and Technology. Vol. 116. Article 106866. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106866>
- Hu P., Meng Q., Fan T., Cao L., Li Q. 2023. Dynamic response of turbine blade considering a droplet-wall interaction in wet steam region // Energy. Vol. 265. Article 126323. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126323>
- Jingjing B., Linjun Y., Jinpei Y., Guilong X., Bin L., Chengyun X. 2013. Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas // Fuel. Vol. 108. Pp. 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>

- Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova E. G., Zykov I. Y., Islamova A. G. 2019. Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces // *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 553. Pp. 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.059>
- Liang G., Mudawar I. 2017. Review of drop impact on heated walls // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 106. Pp. 103–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.031>
- Lucas M., Martínez P. J., Viedma A. 2009. Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators // *Energy Conversion and Management*. Vol. 50. No. 3. Pp. 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.008>
- Nugent J., Lux S. M., Martin C., Stillwell A. S. 2022. A water and greenhouse gas inventory for hygroscopic building-scale cooling tower operations // *Building and Environment*. Vol. 218. Article 109086. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109086>
- Raman K. A., Jaiman R. K., Lee T. S., Low H. T. 2015. On the dynamics of crown structure in simultaneous two droplets impact onto stationary and moving liquid film // *Computers & Fluids*. Vol. 107. Pp. 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.11.007>
- Shi W., Min Y., Ma X., Chen Y., Yang H. 2022. Dynamic performance evaluation of porous indirect evaporative cooling system with intermittent spraying strategies // *Applied Energy*. Vol. 311. Article 118598. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118598>
- Shublaq M., Sleiti A. K. 2020. Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 175. Article 115418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115418>
- Wang Y., Yu Z., Li K., Hu J. 2020. Effects of surface properties of titanium alloys modified by grinding, sandblasting and acidizing and nanosecond laser on cell proliferation and cytoskeleton // *Applied Surface Science*. Vol. 501. Article 144279. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144279>
- Wörner M., Samkhaniani N., Cai X., Wu Y., Majumdar A., Marschall H., Frohnapfel B., Deutschmann O. 2021. Spreading and rebound dynamics of sub-millimetre urea-water-solution droplets impinging on substrates of varying wettability // *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 95. Pp. 53–73. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.01.038>
- Yilbas B. S., Hassan G., Al-Qahtani H., Al-Sharafi A., Sahin A. Z. 2021. Dust mitigation by rolling water droplets from hydrophobic surfaces // *Surfaces and Interfaces*. Vol. 22. Article 100825. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100825>
- Yu B.-Y., Chien I.-L. 2023. Novel temperature-control strategy for single column side-stream extractive distillation process with intermediate-boiling entrainer // *Separation and Purification Technology*. Vol. 310. Article 123163. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123163>
- Zaitsev D. V., Batishcheva K. A., Kuznetsov G. V., Orlova E. G. 2020. Prediction of water droplet behavior on aluminum alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses // *Surface and Coatings Technology*. Vol. 399. Article 126206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126206>

References

- GOST 3647—80. (2004). *Abrasives. Grain sizing. Graininess and fractions. Test methods*. Standards Publishing House. [In Russian]

- GOST 15527—2004. (2004). *Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades*. Standards Publishing House. [In Russian]
- Emelyanenko, K. A., Melnikov, S. N., Proshin, P. I., Domantovsky, A. G., Emelyanenko, A. M., & Boinovich, L. B. (2019). Extreme-wettability textured materials for water collection from aerosols. *Doklady Physical Chemistry*, 489(2), 169–172. <https://doi.org/10.1134/S0012501619120017>
- Koshevar, V. D., Kazhuro, I. P., Shkadretsova, V. G., & Pismenskaya, A. S. (2019). Wetting of isotropic microtextures formed on the surface of glass and aluminium. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 55(3), 309–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-309-317> [In Russian]
- Bernardin, J. D., Stebbins, C. J., & Mudawar, I. (1997). Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(2), 247–267. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00119-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00119-6)
- Cai, Z., Chen, F., Tian, Y., Zhang, D., Lian, Z., & Cao, M. (2022). Programmable droplet transport on multi-bioinspired slippery surface with tridirectionally anisotropic wettability. *Chemical Engineering Journal*, 449, Article 137831. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137831>
- Chen, B., Zhang, Y., Dai, Z., Wang, C., & Zhang, X. (2022). Experimental research on the dynamics of a train of droplets impacting, from droplets to liquid film, continuity and inheritance. *Energy*, 256, Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124670>
- Cunha, A., Serro, A. P., Oliveira, V., Almeida, A., Vilar, R., & Durrieu, M.-C. (2013). Wetting behaviour of femtosecond laser textured Ti–6Al–4V surfaces. *Applied Surface Science*, 265, 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.085>
- Duan, C., & Li, C. (2022). Process improvement for three-column extractive distillation by feed split. *Separation and Purification Technology*, 297, Article 121467. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121467>
- Fu, H., Zhao, R., Long, W., & Cheng, W. (2022). Study on cooling performance of rapid cooling system based on vacuum spray flash evaporation. *Applied Thermal Engineering*, 201, Article 117751. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117751>
- Hu, B., & Guo, J. (2022). Effect of cooling water flow on heat transfer performance of horizontal tube spray falling film evaporator in ORC system. *Energy Reports*, 8, 540–545. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.185>
- Hu, F., Lu, Y., Wu, F., Ming, Y., Xia, G., & Zhang, H. (2021). Breakup and collision of water droplet for mass injection pre-compression cooling. *Aerospace Science and Technology*, 116, Article 106866. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106866>
- Hu, P., Meng, Q., Fan, T., Cao, L., & Li, Q. (2023). Dynamic response of turbine blade considering a droplet-wall interaction in wet steam region. *Energy*, 265, Article 126323. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126323>
- Jingjing, B., Linjun, Y., Jinpei, Y., Guilong, X., Bin, L., & Chengyun, X. (2013). Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas. *Fuel*, 108, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>
- Kuznetsov, G. V., Feoktistov, D. V., Orlova, E. G., Zykov, I. Y., & Islamova, A. G. (2019). Droplet state and mechanism of contact line movement on laser-textured aluminum alloy surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 553, 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.059>
- Liang, G., & Mudawar, I. (2017). Review of drop impact on heated walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 103–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.031>

- Lucas, M., Martínez, P. J., & Viedma, A. (2009). Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.11.008>
- Nugent, J., Lux, S. M., Martin, C., & Stillwell, A. S. (2022). A water and greenhouse gas inventory for hygroscopic building-scale cooling tower operations. *Building and Environment*, 218, Article 109086. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109086>
- Raman, K. A., Jaiman, R. K., Lee, T. S., & Low, H. T. (2015). On the dynamics of crown structure in simultaneous two droplets impact onto stationary and moving liquid film. *Computers & Fluids*, 107, 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.11.007>
- Shi, W., Min, Y., Ma, X., Chen, Y., & Yang, H. (2022). Dynamic performance evaluation of porous indirect evaporative cooling system with intermittent spraying strategies. *Applied Energy*, 311, Article 118598. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118598>
- Shublaq, M., & Sleiti, A. K. (2020). Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using filters. *Applied Thermal Engineering*, 175, Article 115418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115418>
- Wang, Y., Yu, Z., Li, K., & Hu, J. (2020). Effects of surface properties of titanium alloys modified by grinding, sandblasting and acidizing and nanosecond laser on cell proliferation and cytoskeleton. *Applied Surface Science*, 501, Article 144279. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144279>
- Wörner, M., Samkhaniani, N., Cai, X., Wu, Y., Majumdar, A., Marschall, H., Frohnappel, B., & Deutschmann, O. (2021). Spreading and rebound dynamics of sub-millimetre urea-water-solution droplets impinging on substrates of varying wettability. *Applied Mathematical Modelling*, 95, 53–73. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.01.038>
- Yilbas, B. S., Hassan, G., Al-Qahtani, H., Al-Sharafi, A., & Sahin, A. Z. (2021). Dust mitigation by rolling water droplets from hydrophobic surfaces. *Surfaces and Interfaces*, 22, Article 100825. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100825>
- Yu, B.-Y., & Chien, I.-L. (2023). Novel temperature-control strategy for single column side-stream extractive distillation process with intermediate-boiling entrainer. *Separation and Purification Technology*, 310, Article 123163. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123163>
- Zaitsev, D. V., Batishcheva, K. A., Kuznetsov, G. V., & Orlova, E. G. (2020). Prediction of water droplet behavior on aluminum alloy surfaces modified by nanosecond laser pulses. *Surface and Coatings Technology*, 399, Article 126206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126206>

Информация об авторах

Ксения Артуровна Войткова, кандидат физико-математических наук, инженер, Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
bka1801@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2810-6769>

Жанна Андреевна Косторева, кандидат технических наук, академический консультант, Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
zhanna.kostoreva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>

Information about the authors

Kseniya A. Voytkova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Engineer, Butakov Research Center, School of Energy and Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

bka1801@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2810-6769>

Zhanna A. Kostoreva, Cand. Sci. (Tech.), Academic Consultant, Butakov Research Center, School of Energy and Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

zhanna.kostoreva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0545-9211>