

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 10. С. 468–478  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 10, pp. 468–478

Научная статья  
УДК 536.441

## Экспериментальное исследование движения капель при эффекте Лейденфроста на сильно перегретых металлических струнах

П.Г. Макаров<sup>1</sup>✉, А.С. Дмитриев<sup>1</sup>, А.В. Артамонов<sup>1</sup>, А.П. Дроздов<sup>1</sup>

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

✉ *MakarovPG@mpei.ru*

**Аннотация.** Статья посвящена изучению поведения капель воды, помещенных между двумя параллельными нагреваемыми металлическими струнами, расстояние между которыми сравнимо с линейным размером капли. Повышение температуры струн осуществляется за счет Джоулева нагрева до значений, превышающих критические температуры пузырькового и пленочного кипения – 100 и 220–250 °С соответственно. Были испытаны различные конфигурации продольной поверхности струны: гладкая и с обмоткой (прерывистая и сплошная). Эксперименты показали, что на таких типах поверхностей не происходит быстрого выкипания или падения жидкости. Вместо этого капли, аналогично эффекту Лейденфроста, проявляющемуся на плоской перегретой поверхности, левитировали в зависимости от структуры поверхности и (или) величины температуры либо стационарно над струнами, либо направленно вдоль них.

**Ключевые слова:** эффект Лейденфроста, тонкие струны, морфология поверхности, механизм левитации, паровый слой

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность за рекомендации и полезные замечания А.П. Крюкову, В.В. Кузнецову, В.И. Терехову, В.В. Ягову, Е.В. Аметистову.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

**Для цитирования.** Макаров П.Г., Дмитриев А.С., Артамонов А.В., Дроздов А.П. Экспериментальное исследование движения капель при эффекте Лейденфроста на сильно перегретых металлических струнах // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 10. С. 468–478. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177591>

Original article

## Experimental study of the droplets' movement under the Leidenfrost effect on highly overheated metal strings

P.G. Makarov<sup>1</sup>✉, A.S. Dmitriev<sup>1</sup>, A.V. Artamonov<sup>1</sup>, A.P. Drozdov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Research University «MPEI», Moscow, Russia*

✉ *MakarovPG@mpei.ru*

**Abstract.** The article is dedicated to the behavior of water droplets placed between two parallel heated metal strings, the distance between which is comparable to the linear size of the drop. Strings are heated by the Joule heating effect to temperatures exceeding critical temperatures of nucleate and film boiling – 100

© Макаров П.Г., Дмитриев А.С., Артамонов А.В., Дроздов А.П., 2023

and 220–250 °C, respectively. Various configurations of side surface of strings were tested: smooth and with winding (intermittent and continuous). Experiments have shown that these types of surfaces do not cause rapid boiling of droplets or its falling. Behavior of droplets in such systems can be described as levitating: either stationary or with directional movement, depending on surface structure and/or temperature. Numerous experiments have shown that this phenomenon is very similar to the Leidenfrost effect on a flat overheated surface.

**Keywords:** Leidenfrost effect, thin strings, surface morphology, levitation mechanism, vaporous layer

**Acknowledgments.** Authors express their gratitude to A.P. Kryukov, V.V. Kuznetsov, V.I. Terekhov, V.V. Yagov, E.V. Amethystov.

**Financing.** The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00840).

**For citation.** Makarov P.G., Dmitriev A.S., Artamonov A.V., Drozdov A.P. Experimental study of the droplets' movement under the Leidenfrost effect on highly overheated metal strings. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 10, pp. 468–478. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177591>

## Введение

Важным критерием многих процессов в пищевой промышленности, теплоэнергетике и других сферах является то, что для их нормального протекания кипение должно проходить в пузырьковом режиме, которому соответствует наиболее эффективная теплоотдача. В таком случае перегрев ограничен температурой насыщения в области низких температур и температурой, соответствующей кризису кипения I рода, в области высоких. В случае когда перегрев твердой поверхности превышает критическое значение, пузыри образующегося пара начинают объединяться в более крупные образования вплоть до неразрывной пленки пара. Этот режим, называемый пленочным, как правило, реализуется, когда температура перегрева поверхности превышает значение, именуемое температурой Лейденфроста [1, 2]. Эффект образования пленки пара между слоем жидкости и сильно перегретой относительно температуры насыщения поверхностью также назван в честь этого ученого.

Как правило, образование пленки нежелательно, поскольку в таком случае тепловой поток между поверхностью и жидкостью не оптимален для типичных задач теплотехники – охлаждение поверхности более эффективно при низких температурах. Нагрев жидкости в случае, если она является теплоносителем, также значительно эффективней при меньших температурах поверхности. Более того, образующаяся пленка пара не является в полной мере стабильной, что создает опасность ее резкого схлопывания. Это может привести к разрушению технических устройств. Исследования показывают, что модификация поверхности с по-

мощью тонкослойных покрытий [3–5] или путем изменения микрорельефа [6, 7], а также смачивания поверхности [8, 9] позволяет повысить критическую тепловую нагрузку, изменив точку начала пленочного кипения в сторону более высоких температур.

Изучение поведения капель жидкостей при пленочном режиме кипения является достаточно важной задачей: время «жизни» капель до полного испарения становится значительно дольше, форма капель на сильно перегретой поверхности стремится к сферической, что можно сравнить с поведением капель на супергидрофобных поверхностях [10]. Особый интерес представляет реакционная способность капель при эффекте Лейденфроста. При высокой неустойчивости пленки малейшие изменения микрорельефа или наличие градиента температуры вызывают большой отклик в виде перемещения капель вдоль поверхности [11].

Еще одна потенциально интересная особенность эффекта Лейденфроста может проявиться при изучении капель коллоидных растворов, а также капель, содержащих более крупные мезоскопические твердотельные включения. Она проявляется в том, что из-за паровой прослойки между каплей и нагревателем коллоидные частицы не прилипают к твердой поверхности. Образующиеся в таком случае объемные структуры могут стать перспективным объектом исследований.

## Поступательное движение капель

При первичном рассмотрении движения капель на сильно перегретых поверхностях может сложиться впечатление, что оно является хао-

тичным. Однако в последние годы появились исследования, результаты которых говорят о возможности это движение упорядочить [11–14].

Ранее предполагалось, что в большинстве случаев причиной движения капель является гравитация. Кроме того, нестационарное поведение капли может быть вызвано эффектом Марангони, то есть переносом вещества в результате неравномерного распределения коэффициента поверхностного натяжения вдоль границы двух сред [15]. В случае пленочного кипения относительно небольших объемов жидкости это явление может быть вызвано наличием значительного температурного градиента.

В работе [12] описаны исследования перемещения капель фреона R-134a миллиметрового диаметра по латунному нагревателю с оребренной поверхностью. Первоначальное ускорение составляло  $1\text{--}2\text{ м/с}^2$ , пока скорость не достигала постоянного значения в  $5\text{ см/с}$ . Позднее аналогичные исследования были проведены с каплями этанола [16].

В итоге была сформулирована классификация основных причин самопроизвольного перемещения капель жидкостей:

- 1) градиент давления Лапласа, обусловленный неоднородностью радиуса кривизны капли;
- 2) процессы переноса вещества с тыла капли на фронт (волны), порождающие движение капли;
- 3) самопроизвольные колебания капли из-за неоднородной толщины парового слоя способны трансформироваться в кинетическую энергию направленного движения;
- 4) эффект Марангони: коэффициент поверхностного натяжения имеет температурную зависимость, поэтому возможная неравномерность температуры может спровоцировать его неоднородное распределение, а значит, и смещение капель.

Таким образом, пока поверхность, на которой находится капля в режиме Лейденфроста, гладкая, пар вытекает из-под капли равномерно и изотропно. Если же поверхность имеет некий рельеф соответствующего масштаба, то поток пара становится анизотропным, задавая тем самым определенное направление движению капли.

Перечисленные выше причины проявления самопроизвольного перемещения капель напрямую связаны с деформацией формы капли. Возникает вопрос, будет ли наблюдаться анало-

гичное явление в случае, если каплю воды заменить твердым телом. Были проведены эксперименты с дискообразными стержнями из диоксида углерода (сухого льда). Его особенностью является низкая температура сублимации ( $-78,5\text{ °C}$ ). Диаметр стержней составлял  $1\text{ см}$ , а толщина –  $1\text{ мм}$ . Их укладывали на горячую подложку (температура  $350\text{ °C}$ ) с такой же асимметрично-гофрированной структурой, которая представлена в работе [12]. Твердые диски, поставленные на горячую асимметричную гофрированную поверхность, вели себя точно так же, как капли в области контакта: они двигались с постоянным ускорением, после чего их скорость также достигала постоянного значения. Направление тоже совпало.

В результате этого эксперимента был сделан вывод, что наблюдаемое движение обусловлено именно анизотропным течением пара из слоя между поверхностью и объектом, который «толкает» диск. По нашему мнению, сила тяги, действующая на каплю, должна быть пропорциональна ее радиусу в степени  $3/2$ , а скорость – практически не зависит от ее размера. Эксперименты с каплями этанола подтверждают теоретические расчеты, что еще раз доказывает правильность установленной причины изучаемого явления.

Следует отметить, что характеристики движения капель также зависят от геометрических параметров рельефа подложки. Согласно результатам, представленным в работе [16], если радиус капли не превышает расстояния между зубьями гофрированной поверхности, эффект Лейденфроста не способен сдвинуть каплю. При большем размере, как следует из теории, разработанной авторами статьи [16], скорость капли пропорциональна квадратному корню из отношения расстояния между поверхностными зубьями к ее высоте.

Управляемое самоцентрирующееся движение и транспортировка капель с низким трением с использованием елочной структуры рельефа поверхности, нагретой до температуры Лейденфроста, было исследовано коллективом ученых Нортумбрийского университета в 2019 г. [17]. Они использовали поверхность, похожую по структуре на поверхность, используемую в работе Линке, но отличающуюся неоднородностями, образующими зеркальную структуру в форме елочки.

В последние годы научное сообщество активно изучает фундаментальные основы кипения различных жидкостей на нагреваемых объектах с поверхностью не плоской геометрии [18]. Существуют работы по изучению пузырькового и пленочного кипения, например, на шарообразных телах [19], цилиндрических [20–22], а также на сеточных структурах [23].

Настоящая работа развивает идею исследования управляемого перемещения капель на сильно перегретых твердых поверхностях. В качестве таких поверхностей были выбраны металлические струны различного рельефа. При такой конфигурации нагревателя поверхность под каплей будет не замкнутой, что позволит изучить взаимодействие пленки пара с твердой поверхностью.

## Методы и материалы

### Экспериментальный стенд

Исследование эффекта Лейденфроста проводилось на специально созданном для этого экспериментальном стенде (рис. 1):

Две параллельные струны (1), изготовленные из нихрома (сплав, характеризующегося высокими рабочими температурами (до 1100 °С) и механической прочностью (предел прочности около 0,8 ГПа)), натянуты между двумя керамическими плитками, обладающими хорошими тепло- и электроизоляционными свойствами (2). Струны укладываются в канавки, выточенные на верхних сторонах плитки. Расстояние между центрами канавок 2 мм. Плитки устанавливаются вертикально на платформу из текстолита (3). На платформе сбоку от плитки закреплена система натяжения струн (4) для борьбы с их

провисанием при нагреве (коэффициент линейного теплового расширения нихрома  $(18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1})$ ). Система состоит из вручную перемещаемой по вертикали панели, на которой установлены два керамических изолятора (5), к которым прикреплены струны. Платформа 3 установлена в оптический микроскоп (6), при этом ее вертикальное положение может настраиваться регулировочным колесом микроскопа (7) для фокусировки.

Нагрев струн осуществляется путем подачи на них разности потенциалов, величина которой регулируется комплектом трансформаторов (регулируемый автотрансформатор (8) и понижающий трансформатор (9)). Для контроля силы тока в цепь включен амперметр (10), к которому последовательно с помощью штыревых зажимов (11) подключены металлические струны-нагреватели. Дистиллированная вода подается на струны через установленный на штативе дозатор (12). Начальный объем наносимых капель составлял 35 мкл, что приблизительно соответствует диаметру 4 мм. Это значение оставалось неизменным для всех экспериментов.

Измерение температуры нагревателя без нанесенной капли производилось с помощью контактной термопары типа К, обеспечивающей достаточно широкий рабочий диапазон температур с приемлемой точностью (0,1 °С до 300 °С и 1 °С при превышении 300 °С).

### Нагревательные струны

В рамках работы предусмотрено исследование взаимодействия капель воды с тремя конфигурациями поверхности струн, представленными на рис. 2. В основе каждой из них лежит

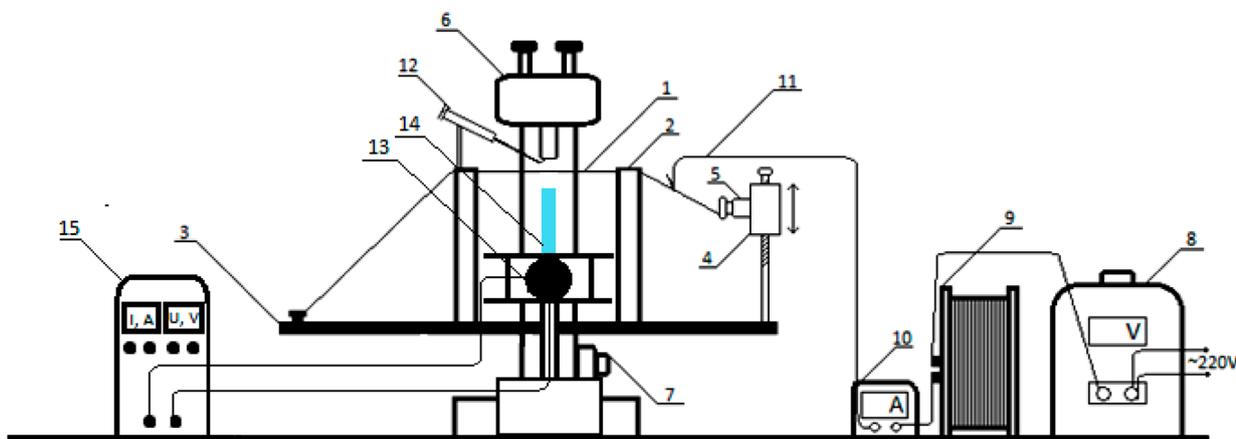


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

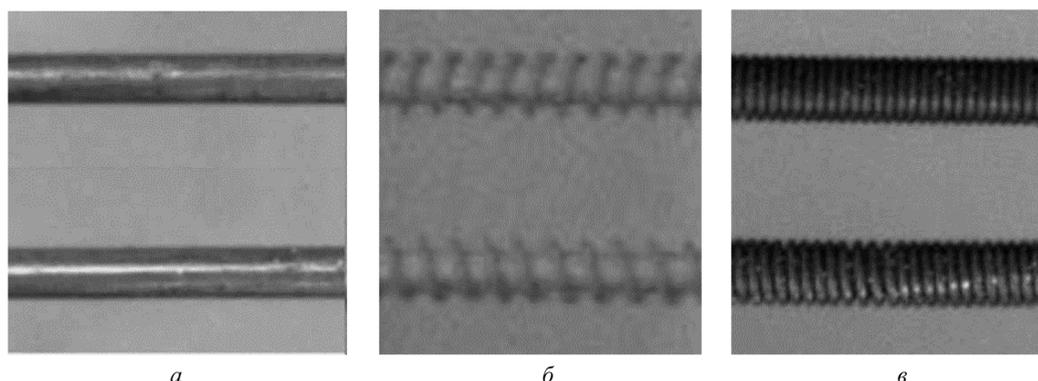


Рис. 2. Различные виды поверхности применяемых нихромовых струн: *a* – гладкие; *б* – с прерывистой обмоткой; *в* – со сплошной обмоткой

гладкая нихромовая струна диаметром 0,4 мм, а отличаются они рельефом поверхности:

Изображенные на рис. 2*а* струны представляют собой простейший вариант нагревательной поверхности, являющийся базовым для всех остальных. На рис. 2*б* представлен вариант с прерывистой обмоткой: вторая проволока, также изготовленная из нихрома, диаметром 0,1 мм, наматывается вокруг первой более толстой. Намотка производилась с помощью электродвигателя: его вал установлен соосно с основной струной, прикрепленной к валу. Постоянный шаг обмотки 0,2 мм обеспечивался зажимом и фиксированной скоростью вращения вала. Направление намотки на двух струнах было противоположным, поэтому одна струна с обмоткой была зеркальным отражением другой. На рис. 2*в* показан внешний вид нагревательных струн со сплошной обмоткой. Набор компонентов такой же, как и в предыдущей конфигурации. Отличие в том, что в этом случае обмотка уложена без промежутка – каждый последующий ее виток ложится вплотную к предыдущему. Следует отметить, что в эксперименте не осуществлялась электроизоляция ни осевой проволоки, ни обмотки. С одной стороны, это могло сказаться на плотности теплового потока, с другой – не менялась смачиваемость поверхности нагревателя.

Напряжение на струны подавалось по схеме, представленной на рис. 1. За счет Джоулева нагрева из-за конечного сопротивления проводника струны начинали нагреваться. Нанесение обмотки снижает скорость нагрева струн, то есть для достижения одинаковой температуры струны с обмоткой требовали большего напряжения, чем струны без нее. Одной из причин является увеличение площади рассеивания

тепла. Благодаря этому свойству можно добиться более точной настройки температуры (рис. 3):

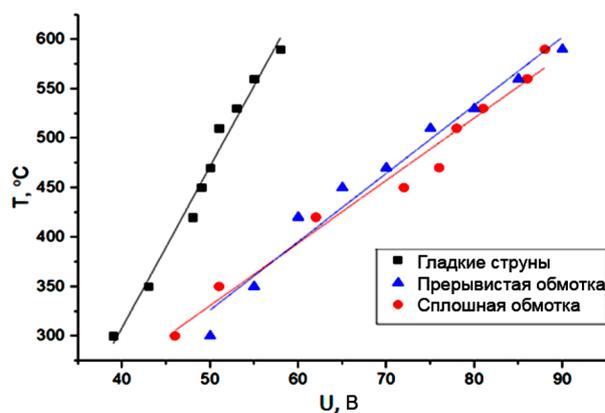


Рис. 3. Зависимость температуры струн от приложенного напряжения

## Результаты и анализ

Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия капли дистиллированной воды с различными типами неоднородных поверхностей, в частности с параллельными металлическими струнами, нагретыми выше температуры Лейденфроста. В первую очередь следует изучить этот вид взаимодействия, но без дополнительного нагрева, то есть выделить параметры, влияющие на поведение капли, за исключением температуры и теплового потока.

При выдавливании некоторого количества жидкости на две параллельные струны образовавшаяся капля может либо стекать между ними, либо оставаться на них (рис. 4*а*), либо висеть под нитями (рис. 4*б*).

Очевидно, что тип взаимодействия зависит от различных параметров: расстояния между нитями, критического объема воды, при кото-

ром капля не стекает вниз, и диаметра струн. Качественная оценка влияния сочетаний этих параметров на тип взаимодействия капель со струнами показала, что для всех расстояний между струнами критический объем удерживаемой капли растет с увеличением диаметра нагревателей. Кроме того, для расстояний между струнами до 1,4 мм поведение капель соответствует рис. 4а, при превышении этого расстояния они провисают под струнами.

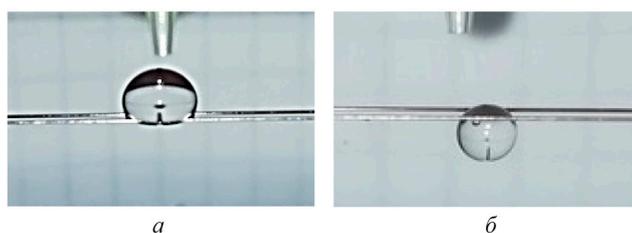


Рис. 4. Типичные способы взаимодействия двух параллельных металлических струн с каплей воды: а – капля смачивает поверхность струн сверху; б – капля смачивает струны снизу

На основании описанных выше результатов были сформированы конфигурации для экспериментальной установки: все последующие опыты проводились на струнах из нихромовой проволоки диаметром 0,4 мм, натянутых на расстоянии 1 мм между ними, если не указано иное.

Было выбрано три вида внешней поверхности струн: гладкие (базовая проволока), с прерывистой обмоткой и с плотной обмоткой.

#### Гладкие струны

На струнах с гладкой поверхностью профиль капли соответствовал рис. 5а. Капля была либо неподвижна, либо качалась вокруг стабильного положения. Капля оставалась над срединной линией струн до тех пор, пока ее диаметр не становился меньше расстояния между струнами (рис. 5б):

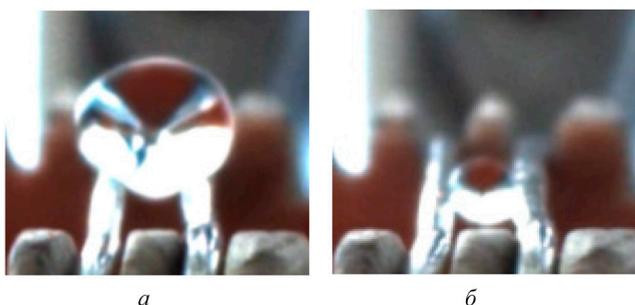


Рис. 5. Капля на гладкой конфигурации в начальный (а) и конечный (б) моменты ее жизни.

В первой серии экспериментов напряжение регулировалось с помощью лабораторного автотрансформатора регулируемого (ЛАТР) в диапазоне от 40 до 60 В, что соответствовало температурам в диапазоне от 300 до 600 °С. Для каждой температуры измерялось время жизни капли на струнах. На основании полученных результатов был построен следующий график зависимости времени жизни капель от температуры поверхности струн (рис. 6):

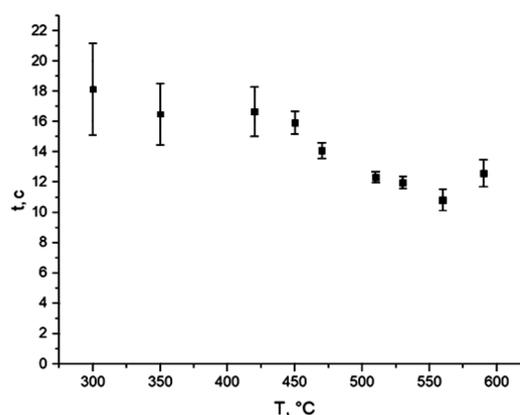


Рис. 6. Влияние температуры гладких струн на время жизни каплей воды

Как видно из рис. 6, чем выше устанавливалась температура поверхности струн, тем меньше становилось среднее время жизни капли. Было также замечено, что при более низких температурах периоды хаотических колебаний капель значительно короче, чем все время жизни. Но начиная с 470 °С капли испытывали периодические колебания в течение практически всего времени нахождения на струнах. Стоит отметить, что при касании керамических стенок капля взрывным образом испарялась.

Можно предположить, что время жизни уменьшается из-за того, что с повышением температуры перегретой поверхности увеличивается интенсивность парообразования, что приводит к более быстрому испарению капли. Однако при наибольшей температуре (590 °С) время жизни капель несколько увеличивается.

#### Струны с постоянным шагом намотки

Вторая часть экспериментов заключалась в проведении опытов с нихромовыми струнами диаметром 0,4 мм с нанесенной прерывистой намоткой (расстояние между витками – 0,1 мм, диаметр проволоки обмотки – 0,1 мм). При температурах 300 и 350 °С можно было наблю-

дать моментальное, взрывное вскипание капель при контакте со струнами. При повышении температуры струн до 420 °С почти в половине случаев возникает эффект Лейденфроста, капли остаются неподвижными, как показано на рис. 7:

Пока капли оставались на нитях, они продолжали испаряться, по мере чего объем жидкости, удерживаемой над струнами, уменьшался, соответственно, центр тяжести капель смещался вниз до тех пор, пока капля не переставала удерживаться над нитями. Однако в отличие от обычных нитей капли не падали вниз, а висели на нитях снизу, продолжая испаряться (рис. 7в).

Кроме того, было замечено и другое поведение капель при такой температуре: капли взрывались или прыгали обратно на иглу дозатора при соприкосновении с нагретыми нитями.

При повышении температуры до 450 °С приблизительно в 10 % случаев наблюдалось направленное движение капли по поверхности струн. Чаще же капли оставались неподвижными над струнами. При дальнейшем повышении температуры струн соотношение движущихся и неподвижных капель увеличивается, например при температуре 590 °С движется 100 % капель. Возможное объяснение: с увеличением температуры перегретых струн увеличивается толщина слоя пара между каплей и цилиндрической поверхностью обмотки. Паровой слой поддерживает каплю над поверхностью струн, не допуская непосредственного контакта ее с нагретой твердой поверхностью, а также благодаря геометрии нагревателя позволяет ей, отталкиваясь от обмотки, двигаться. Таким образом, чем выше температура поверхности, тем толще слой пара и тем больше реактивные силы, действующие со стороны перегретой поверхности перпендикулярно центру капли.

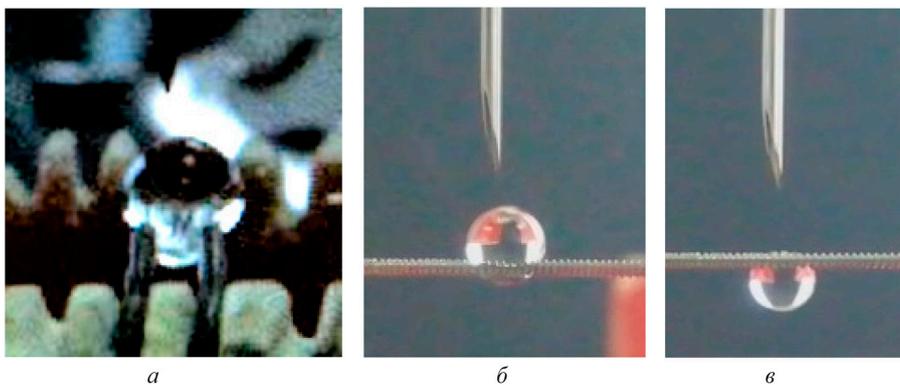


Рис. 7. Капля, остающаяся на струнах с плотной обмоткой: левитирующая на них, вид спереди (а) и сбоку (б); провисшая между струн (в)

Аналогично предыдущему опыту было измерено время жизни капель при разных температурах (рис. 8). Оказалось, что вид кривой отличается от случая с гладкими струнами, показанного на рис. 6: по мере увеличения температуры время жизни капель, наоборот, возрастает. Связано это, вероятно, с тем, что при относительно низких температурах пленка пара не обладает значительной толщиной, а неравномерности рельефа нагреваемой поверхности нарушают ее целостность. Стоит также отметить, что время жизни при двух случаях соизмеримы при высоких температурах струн.

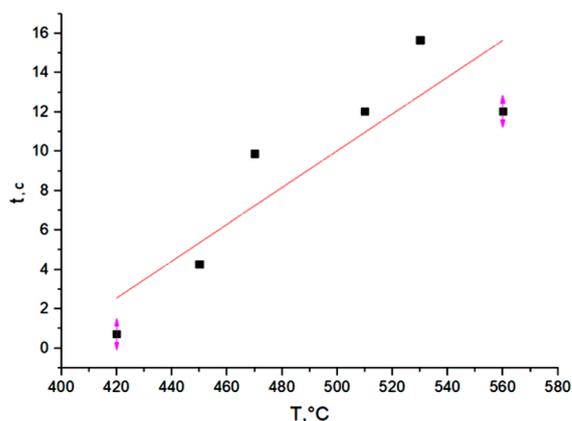


Рис. 8. Температура струн с постоянным шагом обмотки влияет на время жизни капель воды

#### Струны со сплошной обмоткой

Для струн со сплошной обмоткой было замечено, что в интервале температур от 300 до 350 °С эффект Лейденфроста не наблюдается – капля моментально испаряется при соприкосновении со струнами. Но при дальнейшем повышении температуры до 420 °С и выше проявляется эффект Лейденфроста (рис. 9):

По результатам наблюдений капля движется по направлению струн практически в каждом из трех случаев контакта со струнами при 420 °С. В оставшейся трети всех случаев капли стекали со струн. При дальнейшем повышении температуры струн количество движущихся капель увеличивается. Например, при 560 °С движется почти все капли.



Рис. 9. Капля, левитирующая на непрерывных горячих никромовых нитях: *а* – вид спереди; *б* – вид сбоку

В отличие от двух предыдущих серий экспериментов капли при непрерывном наматывании струн не оставались неподвижными, а двигались вдоль струн в определенном направлении. Поэтому в этой части исследования не было возможности измерить время жизни капель.

#### Направление и скорость движения

Как упоминалось ранее, направление движение капель по струнам сильно зависит от ориентации обмотки (рис. 10), в частности было замечено, что капли движутся по направлению схождения витков обмотки. Если назвать получающуюся структуру вокруг базовых струн «елочной», то капли двигаются вдоль проволоки по направлению к вершине «дерева». При незеркальной обмотке чаще можно наблюдать неподвижную каплю.

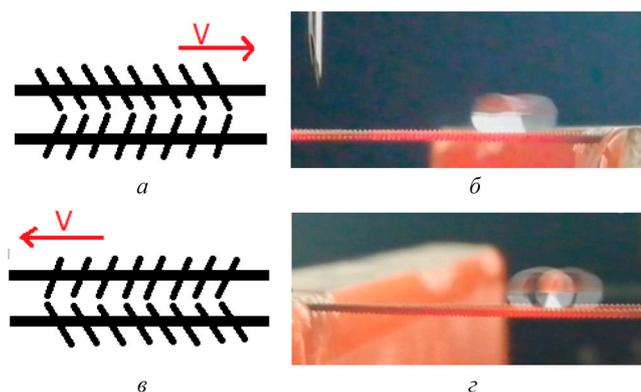


Рис. 10. Схематическое изображение постоянного шага обмотки на струнах (*а*, *в*) и фотографии капель, движущихся вправо или влево в зависимости от ориентации обмотки (*б*, *г*)

Поскольку в случае с прерывистой обмоткой также наблюдалось направленное движение капль, очевидно, было бы интересно измерить и сравнить средние скорости движения капль. Были построены зависимости скорости капль от температуры поверхности струн (рис. 11).

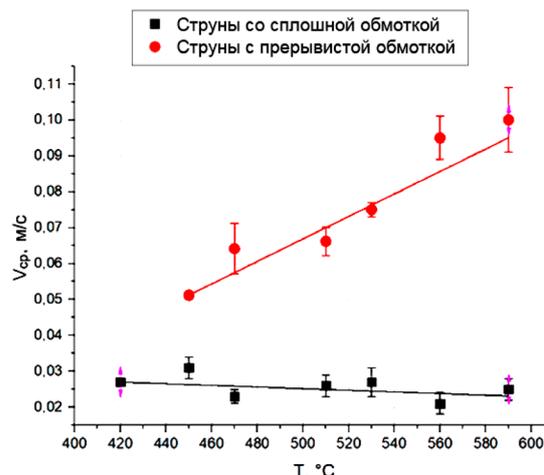


Рис. 11. Зависимость средней скорости капль от температуры поверхности струн и их конфигурации

Повышение температуры нитей заставляет капли при прерывистой обмотке двигаться быстрее, а при сплошной замедляться, но незначительно (рис. 11). Важно, что темп изменения скорости сильно различается, что заметно по углам наклона аппроксимирующих прямых.

Повышение температуры струн приводит к более интенсивному процессу испарения с нижней части капль и более интенсивному вытеканию пара из-под них, из-за чего возникает сила, выталкивающая капль. За счет того что цилиндрические поверхности струн формируют своего рода желоб, вдоль которого могут двигаться капль, одна плоскость возможного движения (выскакивания) капль получается ограниченной (перпендикулярно оси проволоки). Капль остается лишь одно направление для движения – вдоль струн. В случае обмотки с постоянным шагом это приводит к увеличению скорости.

Уменьшение скорости капль при плотной обмотке с повышением температуры струн можно объяснить тем, что рельеф, образованный тонкой плотной обмоткой, слишком мал для достижения таких скоростей, как у струн с прерывистой обмоткой. Иначе говоря, площадь поверхности, от которой капль могут отталкиваться, недостаточно велика, струна для пленки пара практически гладкая.

#### Вращение капль

Тем не менее нельзя сказать, что движения нет вообще, даже если капль покоится без линейного перемещения. Как уже отмечалось, потоки пара, вытекающие из-под нижней части капль, встречая на своем пути виток обмотки,

отталкиваются от него, что выражается в перемещении и самих капель. В уже описанных случаях структура рисунка была зеркальной, поэтому проекции толкающих сил на срединную ось сонаправлены, и капля движется в таком же направлении. В случае же с незеркальным узором направления сил (их проекции) разнонаправлены, соответственно если вблизи одной струны пар толкает каплю, допустим, влево, то вблизи другой – вправо. В результате этого положение капли оставалось без линейного перемещения по нитям, однако в таком случае возникает направленное вращение вокруг своей оси (рис. 12):

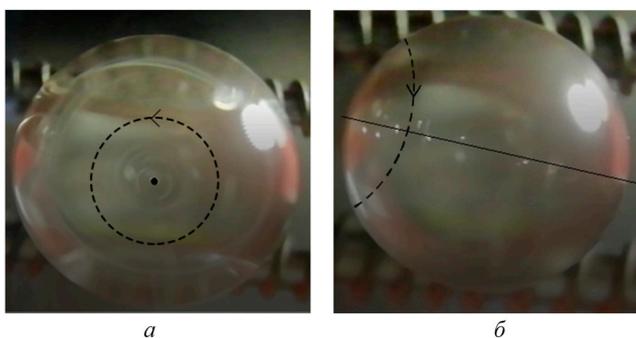


Рис. 12. Фотографии вращающейся капли: *а* – ось вращения перпендикулярна горизонтальной поверхности, *б* – ось вращения расположена вдоль горизонтальной поверхности

### Заключение

Впервые получено описание поведения капль воды на нагретых до температур свыше  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  параллельных металлических струнах. При строгом позиционировании дозатора, когда его проекция лежит ровно между нагреваемых струн, наносимые капли не падают, не выкипают, а левитируют над срединной плоскостью струн. Это явление может сопровождаться покоящимся состоянием, а также как хаотичным, так и направленным линейным перемещением капль. Характер поведения зависит от рельефа струн. В настоящей работе исследовались гладкие струны, а также струны с плотной и прерывистой обмоткой.

Эксперименты показали, что капли на подобных поверхностях быстро не выкипают и не падают между струн. Вместо этого для них было характерно поведение, которое можно описать как левитирующее: устойчивое или с направленным движением в зависимости от структуры поверхности и температуры нагрева. Многочисленные эксперименты показали, что

такое поведение очень похоже на эффект Лейденфроста, проявляющийся на плоской горячей поверхности жидкостями.

Поведение капль на гладких нихромовых нитях может носить различный характер. Они могут как левитировать неподвижно, раскачиваясь вокруг устойчивого положения до тех пор, пока диаметр капль не станет меньше расстояния между струнами, так и линейно перемещаться в любом направлении. Чем выше была температура поверхности струн, тем короче становилось среднее время жизни капль.

На струнах с прерывистой намоткой наблюдаемый процесс довольно сильно зависит от температуры. На струнах с температурой  $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  капли мгновенно выкипают. При температуре выше  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  капли либо проваливаются между струн, либо неподвижно левитируют. При  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  примерно 10 % наносимых капль начинает линейно перемещаться в определенном направлении. С дальнейшим увеличением температуры струн эта пропорция меняется. При  $590\text{ }^{\circ}\text{C}$  все наносимые капли перемещаются.

На струнах с плотной обмоткой ситуация с температурной зависимостью была практически такой же, за исключением того, что не наблюдалось стационарной левитации всплывания капль: они либо стекают вниз, либо демонстрируют постоянное движение.

Эксперименты показали, что направление линейного движения зависит от ориентации витков обмотки. Капля, левитирующая над струнами, движется к вершине «елочки». В ситуациях, когда направление обмотки на двух струнах не симметрично (однонаправленно), капля, как правило, остается недвижимой. Однако в таком состоянии капль было обнаружено вращающееся движение вокруг своей оси.

Обнаруженное явление может представлять интерес для изучения капльструйного жидкостного охлаждения. Обнаруженное смещение начала пленочного кипения на цилиндрических греющихся поверхностях в сторону больших температур, по сравнению с общепринятыми данными для плоской гладкой поверхности, позволяет расширить горизонт рабочих температур нагревателей. Кроме того, явление перемещения жидкости без значительных потерь можно использовать в целях транспорта капль строго определенного необходимого объема

(принтерные технологии, технологии нанесения тонких пленок).

Помимо потенциальной практической ценности описанные исследования несут в себе и теоретическую значимость, поскольку кипение жидкости на специально подготовленных цилиндрических поверхностях неоднородного рельефа сегодня мало изучены. Эффект Лейденфроста, для гладкой поверхности проявляющийся при тепловом напоре сверх температуры насыщения воды в 120–150 °С, для описанных морфологий возникает при перегреве в 300 °С и более.

#### Список источников

1. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Издательство «Наука», 1984. 303 с.
2. Liu X., Zou Q., Yang R. Theoretical analysis of bubble nucleation in liquid film boiling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. № 192. 122911. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122911>
3. Дедов А.В., Забириков А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В. Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // *Теплофизика высоких температур*. 2019. Т. 57. № 1. С. 72–82. DOI: 10.1134/S0040364419010046
4. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С., Чистякова А.В., Звонарев Ю.А., Жуков В.М., Васильева Л.Т. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро и нанорельефом // *Теплоэнергетика*. 2014. № 3. С. 35–38. DOI: 10.1134/S0040363614030060
5. Song Y., Diaz-Marín C., Zhang L., Cha H., Zhao Y. and Wang E. Three-Tier Hierarchical Structures for Extreme Pool Boiling Heat Transfer Performance // *Advanced Materials*. 2022. No. 34. Article number 2200899. DOI: 10.1002/adma.202200899
6. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *Теплофизика высоких температур*. 2021. Т. 59. № 2. С. 280–312. DOI: 10.31857/S0040364421020149
7. Makarov P.G., Artamonov A.V., Dmitriev A.S. Study of the Leidenfrost Effect on Heterogeneous Surfaces of Complex Structure // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 2039. Article number 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/2039/1/012017
8. Kim H., Kim D. Effects of surface wettability on pool boiling process: Dynamic and thermal behaviors of dry spots and relevant critical heat flux triggering mechanism // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. № 180. 121762. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121762
9. Zhang L., Guo Z., Sarma J., Zhao W. and Da X. Gradient Quasi-Liquid Surface Enabled Self-Propulsion of Highly Wetting Liquids // *Advanced Functional Materials*. 2021. No. 31. Article number 2008614. DOI: 10.1002/adfm.202008614
10. Sobac B., Rednikov A., Dorbolo S., Colinet P. Leidenfrost effect: Accurate drop shape modeling and refined scaling laws // *Physical Review E*. 2014. № 90. 053011. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.053011
11. David Quéré. Leidenfrost dynamics // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2013. № 45(1). PP. 197-215. DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140709
12. Linke H., Alemán B.J., Melling L.D., Taormina M.J., Francis M.J., Dow-Hygelund C., Narayanan V., Taylor R., Stout A. Self-Propelled Leidenfrost Droplets // *Physical review letters*. 2006. No. 96(15). Article number 154502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.154502
13. Pyshar Yi, Thurgood P., Nguyễn N., Abdelwahab H., Petersen P., Gilliam C., Ghorbani K., Pirogova E., Tang S., Khoshmanesh K. Oscillation and self-propulsion of Leidenfrost droplets enclosed in cylindrical cavities // *Soft Matter*. 2020. № 16(38). PP. 8854-8860. DOI: 10.1039/D0SM01153C
14. Mengyao Wei, Youngsup Song, Yangying Zhu, Daniel J. Preston, Chuan Seng Tan, Evelyn N. Wang. Heat transfer suppression by suspended droplets on microstructured surfaces // *Applied Physics Letters*. 2020. № 116. 233703. DOI: 10.1063/5.0010510
15. Chen-li. Sun, Van P. Carey. Marangoni effects on the boiling of 2-propanol/water mixtures in a confined space // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. No. 47(25). P. 5417–5426. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.014
16. Lagubeau G., Le Merrer M., Clanet C., Quéré D. Leidenfrost on a ratchet // *Nature Physics*. 2011. No. 7(5). P. 395–398. DOI: 10.1038/nphys1925
17. Dodd L., Agrawal, P., Parnell M., Gerald N.R., Xu B., Wells G., Stuart-Cole S., Newton M.I., McHale G., Wood D. Low-Friction Self-Centering Droplet Propulsion and Transport Using a Leidenfrost Herringbone-Ratchet Structure // *Physical Review Applied*. 2019. No. 11(3). Article number 034063. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.034063
18. Upot N., Rabbi K., Khodakarami S., Ho J., Mendizabal J., Miljkovic N. Advances in micro and nanoengineered surfaces for enhancing boiling and condensation heat transfer: a review // *Nanoscale Advances*. 2023. No. 5. Article number 1232. DOI: 10.1039/d2na00669c
19. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Гусаков А.А., Павлов А.В., Бобылев П.Г. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплотометрии // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13 № 10. С. 434–441. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-10-434-441
20. Sarma P.K., Subrahmanyam T., Rao V.D., Bergles A.E. Turbulent film boiling on a horizontal cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. No. 44(1). P. 207–214. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00061-2
21. Thamil Kumaran S.M., Premachandran B. Study of flow and heat transfer characteristics of saturated flow film boiling over two inline cylinders // *Physics of Fluids*. 2022. No. 34(11). 112123. DOI: 10.1063/5.0125192
22. Lee S., Cha J., Kim K., Choi W. Dynamics of drop impact on heated metal wires: Thermally induced transition from tail to splash to jumping modes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. No. 131. P. 226–236. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.063
23. Qian B., Fan H., Zhang J., Liu G. and Li P. Heat Exchanging Grid Structures Based on Laser-Based Powder Bed Fusion: Formation Process and Boiling Heat Transfer Performance // *Energies*. 2022. № 15(5). 1779. DOI: 10.3390/en15051779

## References

1. Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. Teplomassoobmen i volny v gazozhidkostnykh systemakh. Novosibirsk: Izdatelstvo "Nauka", 1984, 303 p.
2. Liu X., Zou Q., Yang R. Theoretical analysis of bubble nucleation in liquid film boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, no. 192, article number 122911. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122911>
3. Dedov A.V., Zabirov A.R., Sliva A.P., Fedorovich S.D., Yagov V.V. Vliyaniye ugleorodistogo pokrytiya poverkhnosti na teplomassoobmen pri nestatsionarnom plenochnom kipenii. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2019, vol. 57(1), pp. 72–82. DOI: 10.1134/S0040364419010046
4. Kuzma-Klitcha Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P.S., Chistyakova A.V., Zvonarev Yu.A., Zhukov V.M., Vailieva L.T. Issledovaniye intensivatsii teploobmena pri kipenii vody na poverkhnosti s micro i nanoreliefom. *Teploenergetika*, 2014, no. 3, pp. 35–38. DOI: 10.1134/S00403644030060
5. Song Y., Díaz-Marín C., Zhang L., Cha H., Zhao Y. and Wang E. Three-Tier Hierarchical Structures for Extreme Pool Boiling Heat Transfer Performance. *Advanced Materials*, 2022, no. 34. Article number 2200899. DOI: 10.1002/adma.202200899
6. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Intensifikatsiya teploobmena pri kipenii i isparenii zhidkostei na modifitsirovannykh poverkhnostyakh. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2021, vol. 59(2), pp. 280–312. DOI: 10.31857/S0040364421020149
7. Makarov P.G., Artamonov A.V., Dmitriev A.S. Study of the Leidenfrost Effect on Heterogeneous Surfaces of Complex Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, no. 2039, article number 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/2039/1/012017
8. Kim H., Kim D. Effects of surface wettability on pool boiling process: Dynamic and thermal behaviors of dry spots and relevant critical heat flux triggering mechanism. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, no. 180, article number 121762. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121762
9. Zhang L., Guo Z., Sarma J., Zhao W. and Da X. Gradient Quasi-Liquid Surface Enabled Self-Propulsion of Highly Wetting Liquids. *Advanced Functional Materials*, 2021, no. 31, article number 2008614. DOI: 10.1002/adfm.202008614
10. Sobac B., Rednikov A., Dorbolo S., Colinet P. Leidenfrost effect: Accurate drop shape modeling and refined scaling laws. *Physical Review E*, 2014, no. 90, article number 053011. DOI: 10.1103/PhysRevE.90.053011
11. David Quéré. Leidenfrost dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2013, no. 45(1), pp. 197–215. DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140709
12. Linke H., Alemán B.J., Melling L.D., Taormina M.J., Francis M.J., Dow-Hygelund C., Narayanan V., Taylor R., Stout A. Self-Propelled Leidenfrost Droplets. *Physical review letters*, 2006, no. 96(15), article number 154502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.154502
13. Pyshar Yi, Thurgood P., Nguyễn N., Abdelwahab H., Petersen P., Gilliam C., Ghorbani K., Pirogova E., Tang S., Khoshmanesh K. Oscillation and self-propulsion of Leidenfrost droplets enclosed in cylindrical cavities. *Soft Matter*, 2020, no. 16(38), pp. 8854–8860. DOI: 10.1039/D0SM01153C
14. Mengyao Wei, Youngsup Song, Yangying Zhu, Daniel J. Preston, Chuan Seng Tan, Evelyn N. Wang. Heat transfer suppression by suspended droplets on microstructured surfaces. *Applied Physics Letters*, 2020, no. 116, article number 233703. DOI: 10.1063/5.0010510
15. Chen-li. Sun, Van P. Carey. Marangoni effects on the boiling of 2-propanol/water mixtures in a confined space. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, no. 47(25), pp. 5417–5426. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.014
16. Lagubeau G., Le Merrer M., Clanet C., Quéré D. Leidenfrost on a ratchet. *Nature Physics*, 2011, no. 7(5), pp. 395–398. DOI: 10.1038/nphys1925
17. Dodd L., Agrawal P., Parnell M., Gerald N.R., Xu B., Wells G., Stuart-Cole S., Newton M.I., McHale G., Wood D. Low-Friction Self-Centering Droplet Propulsion and Transport Using a Leidenfrost Herringbone-Ratchet Structure. *Physical Review Applied*, 2019, no. 11(3), article number 034063. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.034063
18. Upot N., Rabbi K., Khodakarami S., Ho J., Mendizabal J., Miljkovic N. Advances in micro and nanoengineered surfaces for enhancing boiling and condensation heat transfer: a review. *Nanoscale Advances*, 2023, no. 5, article number 1232. DOI: 10.1039/d2na00669c
19. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V., Gusakov A.A., Pavlov A.V., Bobylov P.G. Issledovaniye kipeniya na poverkhnosti shara metodom gradiyentnoi teplometrii. *Teplovyye protsessy v tekhnike*, 2021, vol. 13(10), pp. 434–441. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-10-434-441
20. Sarma P.K., Subrahmanyam T., Rao V.D., Bergles A.E. Turbulent film boiling on a horizontal cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, no. 44(1), pp. 207–214. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00061-2
21. Thamil Kumaran S.M., Premachandran B. Study of flow and heat transfer characteristics of saturated flow film boiling over two inline cylinders. *Physics of Fluids*, 2022, no. 34(11), article number 112123. DOI: 10.1063/5.0125192
22. Lee S., Cha J., Kim K., Choi W. Dynamics of drop impact on heated metal wires: Thermally induced transition from tail to splash to jumping modes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, no. 131, pp. 226–236. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.063
23. Qian B., Fan H., Zhang J., Liu G. and Li P. Heat Exchanging Grid Structures Based on Laser-Based Powder Bed Fusion: Formation Process and Boiling Heat Transfer Performance. *Energies*, 2022, no. 15(5), article number 1779. DOI: 10.3390/en15051779

Статья поступила в редакцию 15.06.2023; одобрена после рецензирования 06.09.2023; принята к публикации 16.10.2023

The article was submitted on 15.06.2023; approved after reviewing on 06.09.2023; accepted for publication on 16.10.2023