

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо : монография. Томск : STT, 2011. – 183 с. ISBN 978-5-93629-440-2.
2. Исследование аэродинамики и горения в топке котла бкз-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива / А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – С. 175–181.
3. Đugum A Numerical simulation of coal-air mixture flow in a real double-swirl burner and implications on combustion anomalies in a utility boiler / A Đugum, K Hanjalić // Energy. – 2019. – Vol. 170. – P. 942–953. – ISSN 0360-5442.
4. Neumann L.E. Implementation of quadratic upstream interpolation schemes for solute transport into HYDRUS-1D / L.E. Neumann, J Šimůnek, F.J. Cook // Environ. Model. Softw. – 2011. – Vol. 26, № 11. – P. 1298–1308.
5. Теплофизическая и экологическая оценка использования природного газа при реконструкции пылеугольного котла / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, Н.В. Абрамов, С.А. Пузырев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 30–38.

## ПРИЧИНЫ МИКРОВЗРЫВНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ КАПЕЛЬ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ СМАЧИВАНИЯ И ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕЩЕСТВ

**Е.Ю. Лага, Д.М. Клепиков, Г.Е. Котельников, С.П. Бондарчук**

*Томский политехнический университет,  
ИШФВП*

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, к.т.н., доцент ИШФВП ТПУ

К одному из перспективных направлений развития систем охлаждения для теплонагруженных поверхностей, относится новый способ охлаждения, основанный на микровзрывном диспергировании капель теплоносителей. Такое охлаждение позволяет повысить интенсивность и равномерность теплоотвода, значительно сократить расход теплоносителя. В условиях нагрева капель полярных теплоносителей, на поверхности пропитанной дисперсионной жидкостью, происходит их полное микровзрывное диспергирование, что ведет к многократному увеличению площади орошения. Следовательно, микровзрывное диспергирование капель теплоносителей приводит к более равномерному отводу теплоты от теплонагруженных поверхностей [1]. Целью настоящей работы является разработка нового подхода к охлаждению теплонагруженного оборудования за счет диспергирования капель полярных теплоносителей при дозировании их на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью.

В экспериментальных исследованиях в качестве поверхности нагрева использовались пластины алюминиевого сплава АМГ-2 размером 15×15 мм, толщиной 2 мм. На поверхности пластин было сформировано три вида текстур, в т. ч. полированная поверхность.

Первая гр. образцов (№ 1) характеризуется заводской полировкой. По хорошо апробированной методике [2], с помощью абразивного материала со средним размером зерна 100 мкм, сформирована текстура для поверхностей второй группы образцов алюминиевого сплава (№ 2). Поверхности третьей группы образцов (№ 3) модифицировались наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics (IPG-Photonics, Russia). Параметры лазерного излучения: длительность импульса 120 нс, частота 20 кГц. Двухосевым гальваносканером контролировалась скорость перемещения луча 191 мм/с и количество линий прохода 105 на 1 мм. Текстура на поверхности сформирована в условиях однократного прохождения луча.

После модификации поверхностей, образцы очищались в ультразвуковой ванне последовательно в среде изопропилового спирта и ультрачистой воды. Анализ поверхностей показал, что в результате абразивной обработки формируется текстура, состоящая из микро- и наноразмерных неровностей, углублений в виде хаотично расположенных каналов. Поверхность, модифицированная лазерным излучением, имеет более развитую, многоуровневую шероховатость, по сравнению с абразивной обработкой, состоящую преимущественно из элементов в форме шара.

Экспериментальные исследования процессов микровзрывного диспергирования и паффинга в условиях интенсивного кондуктивного нагрева выполнены на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 1.

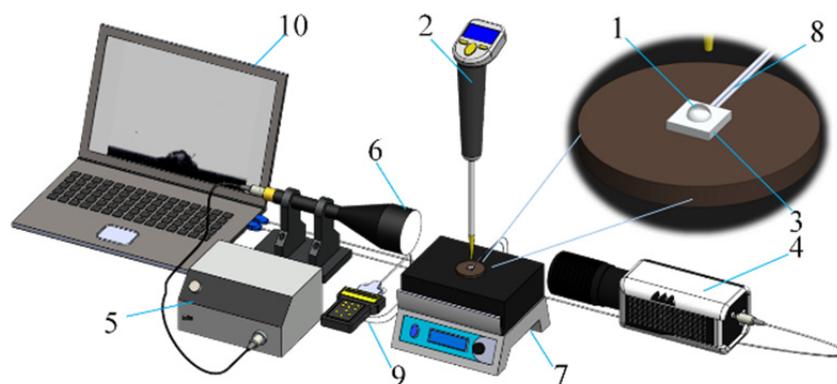


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – капля объемом 5 мкм; 2 – электронный дозатор; 3 – образец алюминиевого сплава; 4 – высокоскоростная видеокамера, оснащенная объективом; 5 – источник света; 6 – телецентрическая оптическая труба; 7 – стеклокерамическая плита; 8 – термопара; 9 – контроллер; 10 – персональный компьютер

Капля 1 дистиллированной воды электронным дозатором 2 помещалась на поверхность образца 3, нагретого до заданной температуры. Исследуемые процессы регистрировались с использованием теневой оптической системы, состоящей из видеокамеры 4, источника света 5 и телецентрической оптической трубы 6. Скорость съемки составляла 1000 к/с. Нагрев образцов осуществлялся при помощи стеклокерамической плиты 7 в диапазоне от 100 до 200 °С при шаге в 10 °С. Малоинерционные хромель-алюмелевые термопары 8, подключенные к контроллеру температуры 9, использовались для регистрации температуры образца. Одна термопара располагалась под алюминиевым образцом, вторая регистрировала изменение температуры образца под каплей жидкости и устанавливалась в отверстие, выполненное с торцевой стороны образца. Толщина стенки между спаем термопары и верхней границей поверхности, на которой расположена капля, не превышала 160 мкм. Погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 0,1$  °С. Данные выводились на персональный компьютер 10. Экспериментальные исследования проводились в двух условиях: в первом случае каплю дистиллированной воды дозировали непосредственно на нагретую поверхность образца, во втором случае поверхность образца пропитывали дисперсионной жидкостью, затем дозировали каплю воды.

На рис. 2 приведены типичные временные зависимости температуры нагрева образца, при начальной температуре 130 °С для поверхности, модифицированной лазерным излучением (рис. 2, а), и поверхности, модифицированной лазерным излучением и пропитанной дисперсионной жидкостью (рис. 2, б).

Установлено, что в диапазоне температур нагрева от 120 до 180 °С, для образцов с поверхностью, модифицированной лазерным излучением и пропитанной дисперсионной жидкостью, в среднем величина охлаждения составила 5,5 °С, что в 3,2 раза ниже, чем у образ-

цов, непропитанных дисперсионной жидкостью (17,7 °С). При этом время прогрева до начальной температуры образца с поверхностью, пропитанной дисперсионной жидкостью, в среднем составляет 20 с, что в 2,9 раз выше по сравнению с образцами, непропитанными дисперсионной жидкостью (7 с).

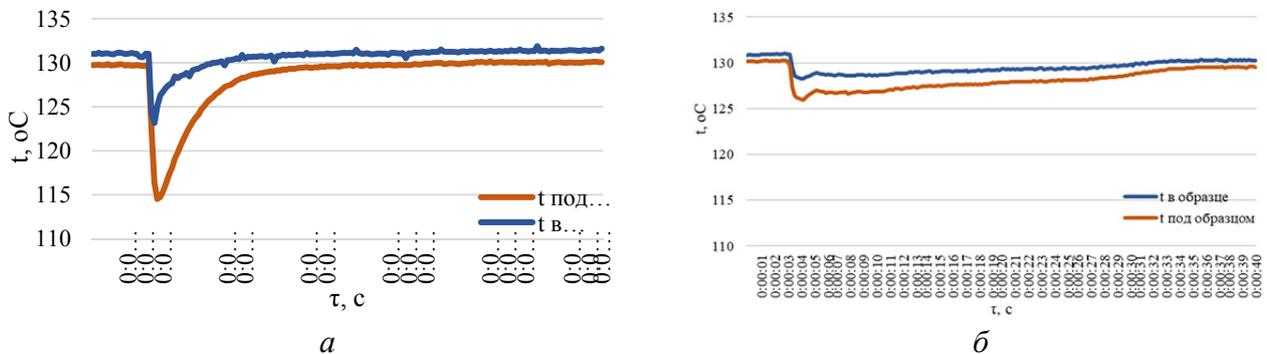


Рис. 2. Типичные временные зависимости температуры нагрева образца алюминиевого сплава при дозировании дистиллированной воды объемом 5 мкл: а) поверхность, модифицированная лазерным излучением; б) поверхность, модифицированная лазерным излучением и пропитанная дисперсионной жидкостью

Предположительно, такой эффект реализуется за счет процесса микровзрывного диспергирования капель дистиллированной воды при их дозировании на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью. Формируемые при взрывном диспергировании вторичные капли на порядок меньше размеров капли, формируемой при прямом дозировании (5 мкл), что позволяет сократить величину охлаждения в среднем в 3,2 раза. А кратное увеличение площади охлаждения, за счет диспергирования исходной капли на десятки и сотни мелкодисперсных фрагментов ведет к более плавному прогреву до начальной температуры образца. Такой эффект позволяет реализовать равномерный отвод тепловых потоков высокой плотности от нагретых поверхностей.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что при дозировании капли дистиллированной воды на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью, с различными видами обработки (полированная, абразивная обработка, модифицированная лазерным излучением) диаметр образованных пузырей в среднем равен 3 мм, что превышает диаметра капли воды объемом 5 мкл (2 мм), что приводит к диспергированию частиц воды. При дозировании воды на поверхности, непропитанные дисперсионной жидкостью, образование пузырей происходит в объеме капли, и средний диаметр (0,3 мм) не превышает диаметр капли. На рис. 3 и 4 представлены типичные видеogramмы нагрева капли дистиллированной воды при дозировании на поверхность № 1–3.

В результате анализа видеogramм установлено, что для протекания физико-химических процессов при нагревании капли воды на поверхностях, пропитанных дисперсионной жидкостью, требуется больше энергии, это выражено в увеличении начальной температуры нагрева поверхности или увеличении времени контакта капли с поверхностью.

Предположительно, увеличение размеров зарождающихся газовых пузырей при дозировании воды на поверхность, пропитанную дисперсионной жидкостью, происходит за счет повышенного поверхностного натяжения, обусловленного присутствием дисперсионной жидкости и ее паров.

Разработан новый подход к охлаждению теплонагруженного оборудования, основанный на диспергировании капель полярных теплоносителей при дозировании их на поверхность образца алюминиевого сплава, пропитанного дисперсионной жидкостью.

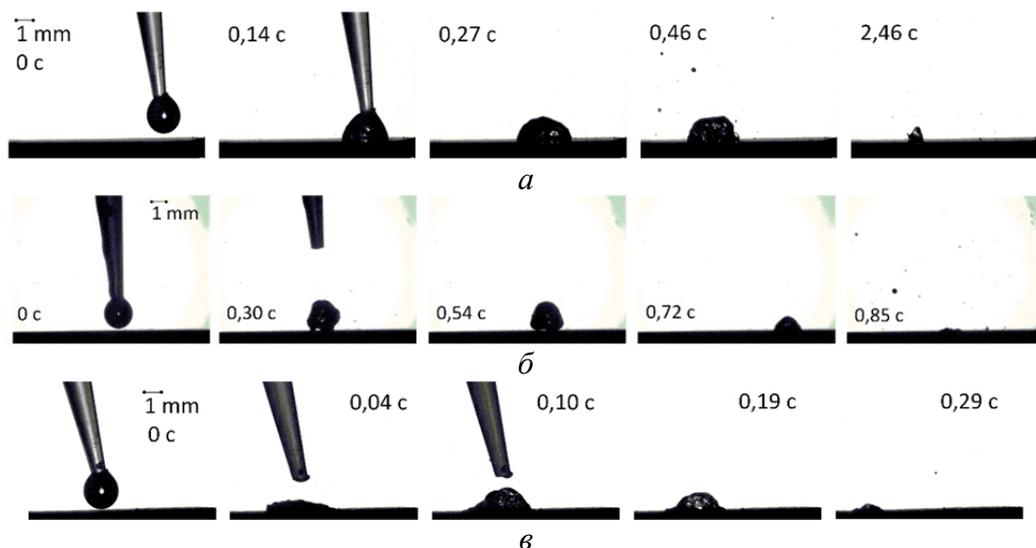


Рис. 3. Типичные видеogramмы капли дистиллированной воды объемом 5 мкл при дозировании на нагретую до  $t = 140$  °C поверхность образца алюминиевого сплава: а) поверхность № 1; б) поверхность № 2; в) поверхность № 3

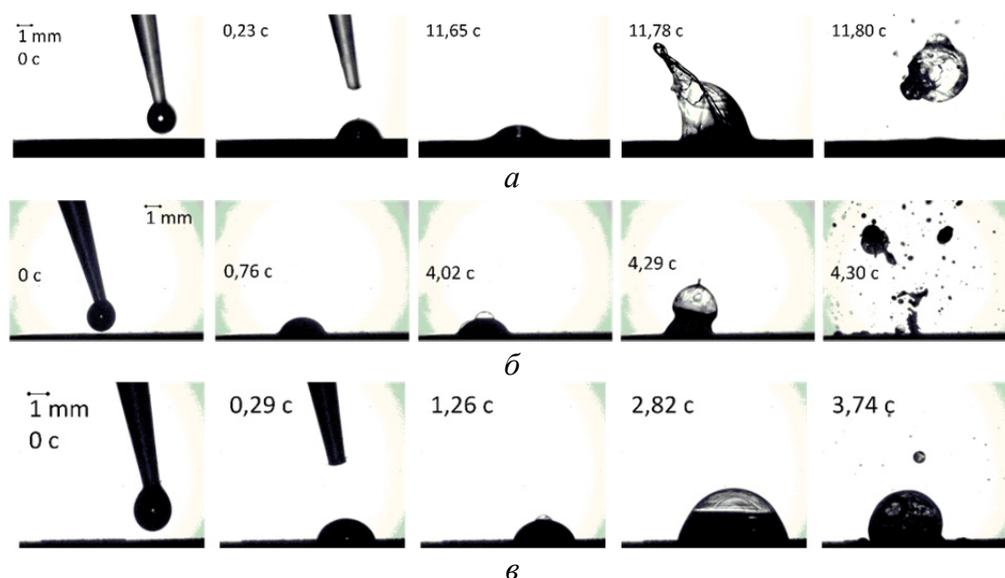


Рис. 4. Типичные видеogramмы капли дистиллированной воды объемом 5 мкл при дозировании на нагретую до  $t = 140$  °C пропитанную дисперсионной жидкостью поверхность образца алюминиевого сплава: а) поверхность № 1; б) поверхность № 2; в) поверхность № 3

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00417, (<https://rscf.ru/project/23-29-00417/>).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение энергоэффективности систем охлаждения энергонасыщенного оборудования путем смещения кризиса теплообмена второго рода в область более высоких температур / Д.В. Феоктистов, Г.В. Кузнецов, А. Абедтазехабади и др. // Известия Томского политехнического университета Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 72–88
2. Influence of roughness on polar and dispersed components of surface free energy and wettability properties of copper and steel surfaces / G.V. Kuznetsov, A.G. Islamova, E.G. Orlova et al. // Surface and Coatings Technology. – 2021. – V. 422. – P. 127518.