

УДК 532.525, 532.522, 532.529

Исследование истечения газокапельного потока из микроканального соплового устройства*

Е.Я. Гатапова^{1,2}

¹*Новосибирский государственный университет*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: gatapova@itp.nsc.ru

Проведена высокоскоростная теневая визуализация газокапельного потока из микроканального соплового устройства при варьировании расхода жидкости от 1 до 50 мл/мин и перепада давления газа от 0,5 до 8 бар. Для этих целей была собрана оптическая система со стереомикроскопом для обеспечения большой глубины резкости и относительно высокого разрешения. Исследовалось истечение для двух типов сопел: трехсопловое устройство с внутренним диаметром каналов 200 мкм и специально изготовленное сопло с микроканальной кремниевой мембраной толщиной 243 мкм и размером микроканалов 10×10 мкм². Были определены углы распыла для единичного сопла и осредненный по трем соплам угол. Получены зависимости углов от расхода жидкости для каждого перепада давления и зависимости от перепада давления при варьировании расхода жидкости. Продемонстрирована возможность организации равномерного газокапельного течения у кромки сопла с каплями малого размера при использовании микроканальной мембраны.

Ключевые слова: сопло, микроканалы, смеситель, спрей, теневой метод, газокапельный поток.

Спрейное охлаждение на настоящий момент рассматривается как одна из наиболее высокоэффективных систем термостабилизации для современных высокоомощных лазеров, светодиодов (LED), радаров и полупроводниковых устройств различного назначения [1, 2]. Например, развитие светодиодной техники, как и других полупроводниковых устройств, идет по пути к увеличению оптической мощности устройств/модулей при уменьшении физических размеров. Следствием этого является соответствующее увеличение тепловыделения. Время безотказной работы, мощность оптического излучения, цветовая температура и другие характеристики светодиодов тесно связаны с температурой его p–n-перехода. Эта сильная связь между производительностью и рабочей температурой делает управление терморегуляцией микроэлектроники важным элементом общей схемы проектирования подобных устройств [3–5].

Изучению эффективности спрейнго охлаждения и влиянию конфигурации устройства сопла, параметров течения на газокапельный поток посвящено большое количество

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00581, <https://www.rscf.ru/project/22-19-00581/>).

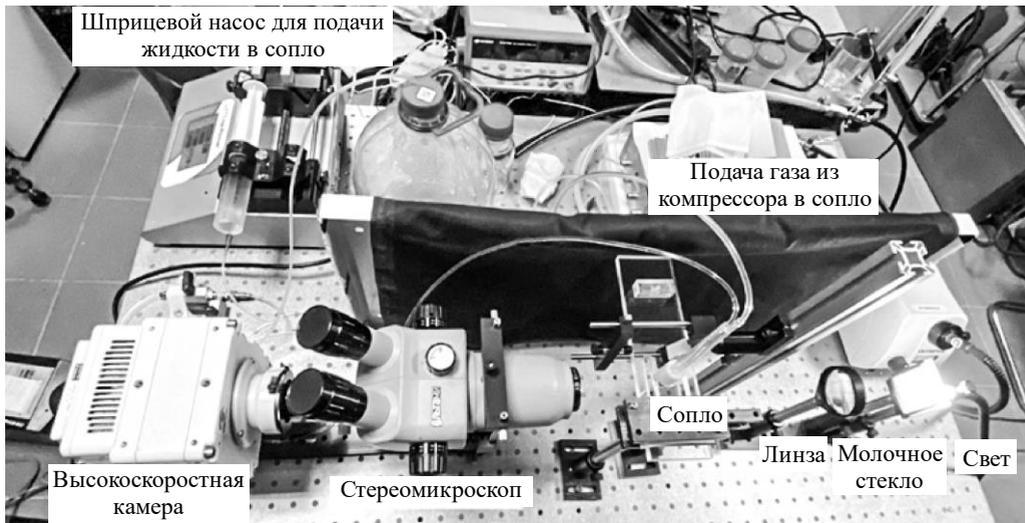


Рис. 1. Высокоскоростная теньевая визуализация газокapельного потока.

работ [6–13]. Однако работы по применению спрейного потока в компактных устройствах встречаются редко. При организации спрейного потока в стесненных условиях стоит задача создания специальных сопел, диспергирующих мелкие капли сразу у кромки сопла, и изучения газокapельного потока у кромки на расстоянии до 1 мм.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования газокapельного потока из двух микроканальных сопловых устройств в зависимости от расхода жидкости и перепада давления воздуха, подаваемых в сопло. Одной из целей является создание газокapельного потока, когда практически возле кромки сопла происходит распад на мелкие капли размерами менее 20 мкм.

Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 1. Оптическая система для теневого метода состоит из источника света Olympus KL 2500 LED, молочного стекла, двояковыпуклой линзы Thorlabs для создания параллельного хода лучей, исследуемого объекта (сопло), стереомикроскопа Altami CM0870-T, высокоскоростной камеры Phantom VEO410 с частотой до 115 кГц. Система использовалась для исследования истечения газокapельного потока из сопла. В качестве рабочих жидкостей использовались ультраочищенная деионизированная вода (MilliQ) и диэлектрическая легкокипящая жидкость HFE-7100 (3M), некоторые свойства этих жидкостей приведены в таблице. В качестве газа использовался воздух. Расход подаваемой в сопло жидкости варьировался от 1 до 50 мл/мин, перепад давления газа — от 0,5 до 8 бар. На основе теньевых изображений были проведены измерения угла факела распыла при различных расходах жидкости и перепадах давления с помощью инструментов программ Phantom CineViewer

Таблица

Физические свойства исследуемых жидкостей

Параметры	ρ , кг/м ³	σ , мН/м				$T_{\text{кип}}$, °C	r , кДж/кг
Температура, °C	20	20	30	40	50	—	20
Жидкость							
HFE-7100	1510	13,6	12,76	11,92	11,08	61	112
Вода	997	72,88	71,20	69,48	67,77	100	2250

Примечание. ρ — плотность, σ — коэффициент поверхностного натяжения, $T_{\text{кип}}$ — температура кипения, r — удельная теплота парообразования.

и ImageJ. Для определения угла распыла использовались несколько кадров видеосъемки. Разрешение при видеосъемке течения из трехсоплового устройства составило 23 мкм/пиксел, а при исследовании течения из микроканальной мембраны составило 13 мкм/пиксел, при этом разрешающая способность остается до 20 мкм/пиксел. Съемка производилась со скоростью 10 и 17 кГц.

Вначале были проведены подробные исследования спреинового течения из трехсоплового смесителя (рис. 2а). Расстояние между соседними соплами 1 мм (от центра одного до центра другого), внешний диаметр сопел 400 мкм, внутренний — 200 мкм. Сопла изготовлены из нержавеющей стали и впрессованы в смеситель из пластика, длина смесителя 135 мм (см. рис. 2б). В смеситель с помощью шприцевого насоса Cole Parmer подавалась жидкость с заданным расходом, а воздух подавался из безмасляного компрессора Atlas Copco. Перепад давления подаваемого газа регулировался с помощью игольчатого крана и контролировался датчиком давления Wika. Сопла в трехсопловом оросителе располагались в один ряд и были цилиндрической формы с внутренним диаметром 200 мкм, что тоже можно назвать микроканалами круглого сечения.

На рис. 3 представлены характерные кадры для микроструйного течения при варьировании расхода воды. Расход Q задавался на шприцевом насосе, так что из каждого сопла вытекала жидкость с расходом $Q/3$. При относительно малом расходе воды ($Q \leq 10$ мл/мин) струи распадались на капли на расстоянии менее 7 мм от кромки сопла. Ширина струй для большинства исследованных расходов, как для воды, так и для HFE-7100, составила (195 ± 4) мкм (т.е. примерно равна внутреннему диаметру сопла). При газокapельном истечении из трехсоплового оросителя отдельные капли не детекти-

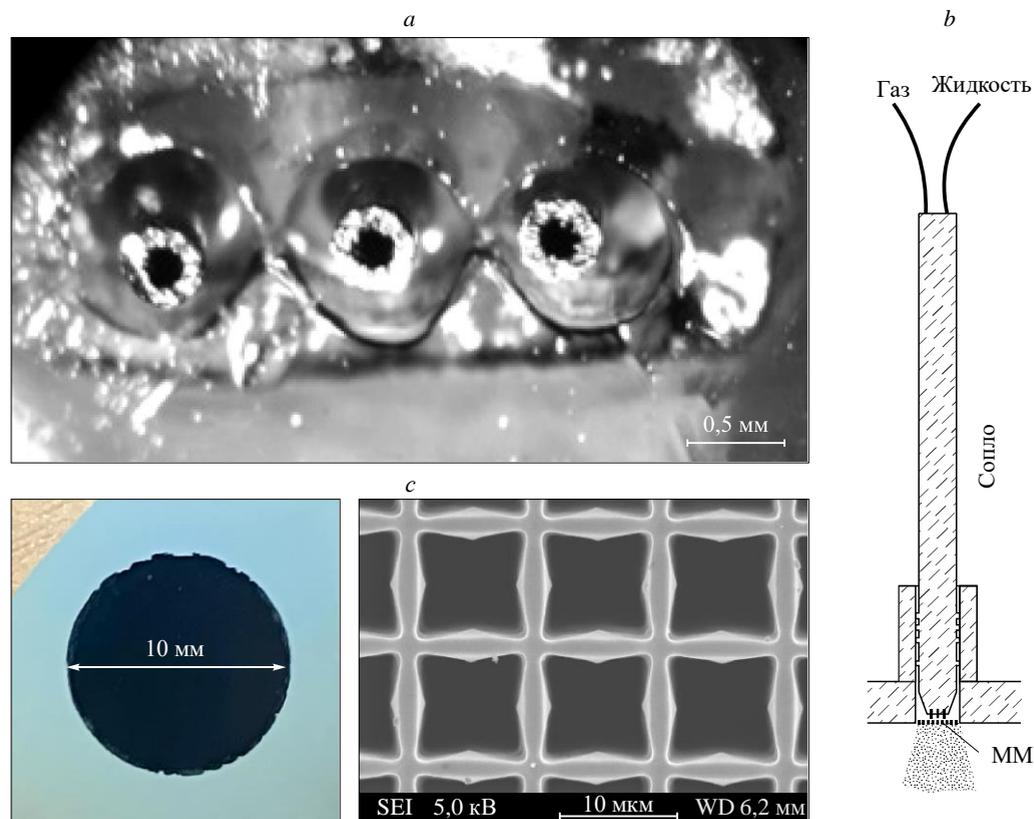


Рис. 2. Трехсопловой смеситель (а), устройство сопла (б) и микроканальная мембрана (ММ) (с).

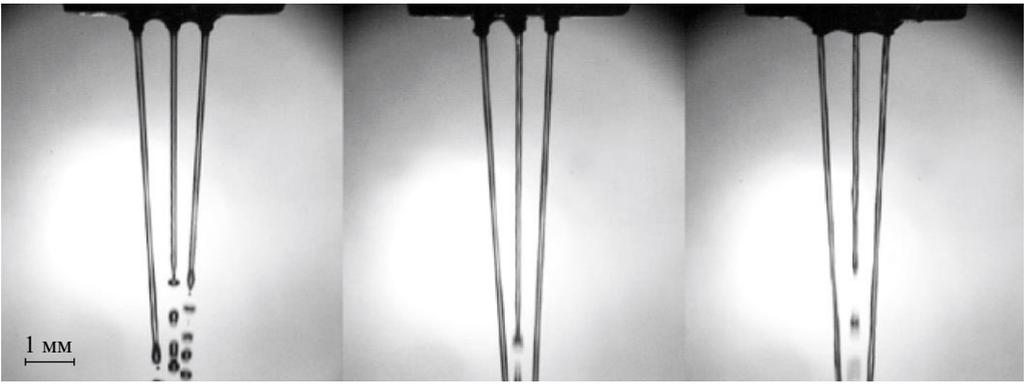


Рис. 3. Микроструйное течение из трехсоплового оросителя.
Вода (слева направо): $Q = 10, 20, 30$ мл/мин.

ровались, поскольку их размер был меньше или соизмерим с оптическим разрешением съемки 23 мкм/пиксел. По оценкам авторов, размер капель может составлять 5–45 мкм.

На рис. 4 приведены серии изображений газокapельного потока для воды и HFE-7100 при варьировании расхода жидкости и перепада давления подаваемого воздуха. Видны четкие различия изменения угла распыла, «густоты потока» и разреженности течения. При больших расходах жидкости ($Q = 40$ мл/мин) и малом перепаде давления ($dP = 0,5$ бар) визуально течение остается микроструйным, по крайней мере, на расстоянии до 4 мм. Были определены углы распыла для единичного сопла и осредненный по трем соплам угол (α). Полученные зависимости величины углов от расхода жидкости для каждого перепада давления приведены на рис. 5, зависимости от перепада давления при варьировании расхода жидкости — на рис. 6. На рис. 5 видно, что есть закономерность

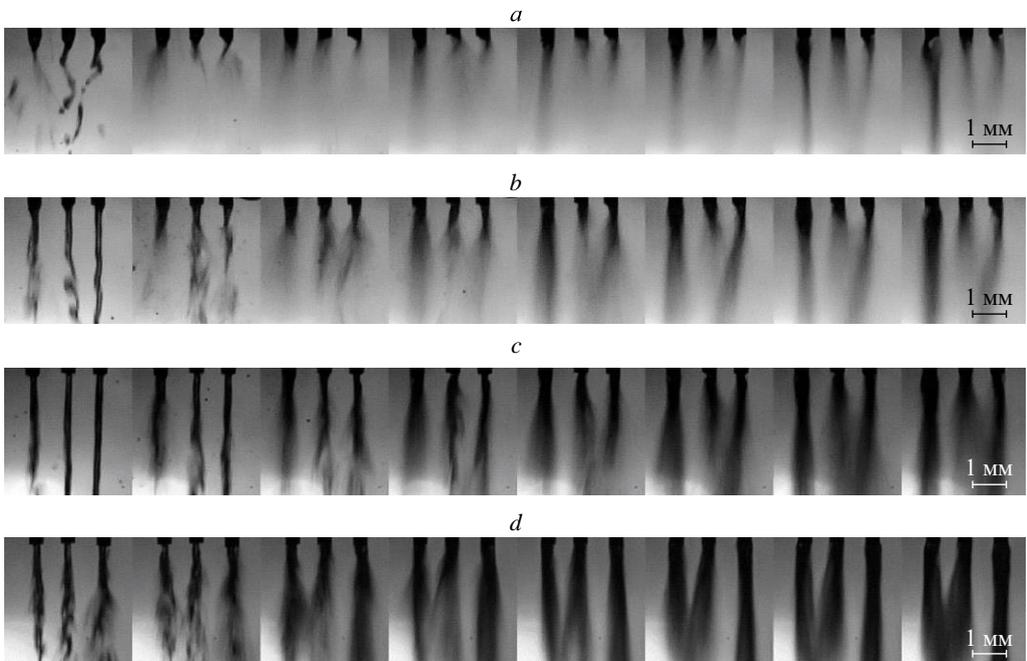


Рис. 4. Газокapельный поток для воды (a–c) и HFE-7100 (d) при варьировании расхода жидкости и перепада давления воздуха.
 $Q = 5$ (a), 20 (b), 40 (c), 20 (d) мл/мин; воздух (слева направо): $dP = 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ бар.

зависимости угла от соотношения расхода жидкости и перепада давления газа. Газокапельное течение по характеру линий можно разделить на три типа зависимостей: для малых перепадов давления ($dP = 0,5$ и 1 бар); умеренных перепадов давления ($dP = 2, 3$ и 4 бар); больших перепадов давления ($dP = 5, 6$ и 7 бар). При малых перепадах давления угол распыла уменьшается с увеличением расхода жидкости. Для умеренных перепадов давления угол распыла варьирует в узком диапазоне от 20° до 35° при изменении расхода воды Q от 5 до 40 мл/мин (соответствует расходу от $1,66$ до $13,33$ мл/мин с каждого сопла). Для больших перепадов давления угол распыла имеет ярко выраженный локальный максимум в районе 20 мл/мин. Подобная зависимость наблюдается на графике изменения угла распыла от перепада давления при варьировании расхода жидкости. Например, при относительно малых расходах угол распыла уменьшался с увеличением перепада давления для воды и жидкости HFE-7100 (см. рис. 6). Согласно полученным данным, поведение угла распыла при изменении перепада давления воздуха для системы вода – воздух сильно различается в зависимости от расхода жидкости. Для жидкости HFE-7100 при умеренных расходах изменение угла распыла при увеличении перепада давления воздуха было более плавным. Такой же тренд уменьшения угла распыла для воды наблюдался при относительно малых расходах жидкости ($5, 10$ мл/мин) (см. рис 6). При расходе воды 20 – 40 мл/мин угол распыла колебался в районе 15 – 40° (рис. 7). Это может быть связано как с качеством съемки, так и со свойствами жидкости. Например, при одинаковом объемном расходе массовый расход будет различаться в $1,5$ раза, так как плотность HFE-7100 в $1,5$ раза больше плотности воды (см. таблицу). Отметим также, что кадры с жидкостью HFE-7100 получаются намного четче и угол определяется гораздо точнее.

Далее, описанный выше исходный трехсопловой ороситель-смеситель (см. рис. 2а) вставлялся в пластину из прозрачного термостойкого оргстекла толщиной 10 мм, все пустоты наполнялись специальным компаундом и заподлицо в пластину встраивалась кремниевая микроканальная мембрана (ММ) толщиной 243 мкм с размером микроканалов 10×10 мкм² (см. рис. 2с). Эта мембрана изготовлена в процессе электрохимического анодного травления монокристаллического кремния дырочного типа, поперечный размер микроканалов 10×10 мкм² (см. рис. 2с). Таким образом, газокапельный поток из смесителя

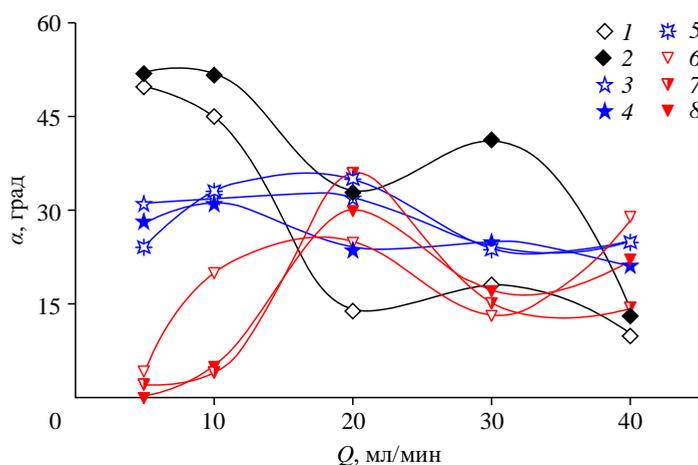


Рис. 5. Изменение угла распыла в зависимости от расхода жидкости для различных давлений воздуха: 1 – 8 — $dP = 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ бар.

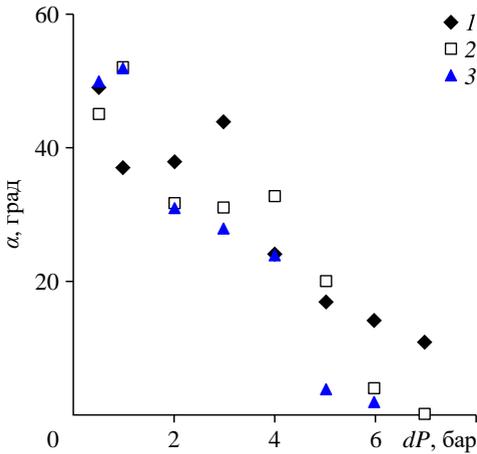


Рис. 6. Изменение угла распыла в зависимости от перепада давления воздуха при расходе $Q = 20$ мл/мин для HFE-7100 (1) и при расходах 5 и 10 мл/мин для воды (3 и 2 соответственно).

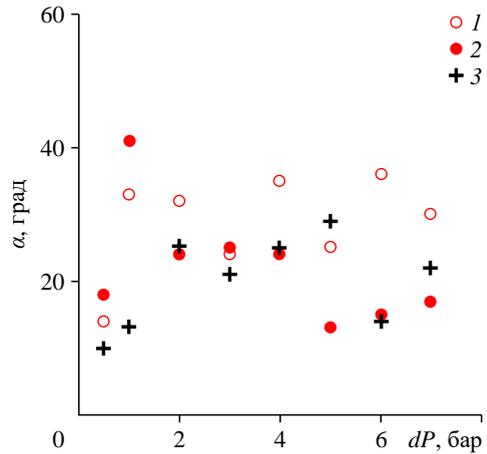


Рис. 7. Изменение угла распыла в зависимости от перепада давления воздуха при расходе воды $Q = 20$ (1), 30 (2), 40 (3) мл/мин.

выходил из трех сопел с внутренним диаметром 200 мкм, а затем вытекал из микроканальной кремниевой мембраны толщиной 243 мкм (см. рис. 2b).

На рис. 8 приведена серия изображений газокпельного потока для жидкости HFE-7100 при расходе 2 мл/мин и перепаде давления от 1 до 8 бар. При относительно низком перепаде давления ($dP = 1$ бар) жидкость плохо продавливалась через мембрану и отмечалось небольшое ее скапливание по краям мембраны. Поэтому на первом изображении слева можно наблюдать относительно большие капли (размерами 20–80 мкм), получившиеся за счет медленного течения и скопления жидкости. При перепадах давления от 3 до 8 бар скопления жидкости не наблюдались либо оно было несущественным. Заметим, что разрешение было увеличено за счет использования другого объектива микроскопа и составило 13,4 мкм/пиксел (однако разрешающая способность все равно будет не лучше 20 мкм). Отдельные капли было невозможно детектировать, но факел распыла был хорошо виден на теневых картинках. По оценкам авторов, при перепаде давления 5–8 бар размер капель составляет менее 10 мкм. Из визуального наблюдения следует, что степень равномерности капельного потока по области орошения увеличивается при использовании микроканальной мембраны. При этом важно использовать относительно малый расход жидкости, чтобы иметь достаточно равномерный поток на выходе из первого сопла. Также продемонстрирована возможность организации равномерного газокпельного течения у кромки сопла с каплями малого размера при использовании ММ.

В заключение отметим, что создано микроканальное сопло нового типа, диспергирующее капли малого размера. Проведена теневая визуализация газокпельного потока



Рис. 8. Газокпельный поток, вытекающий из микроканальной мембраны для HFE-7100 при расходе 2 мл/мин и перепадах давления воздуха (слева направо: $dP = 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8$ бар).

из микроканальных сопловых устройств при варьировании расхода жидкости от 1 до 50 мл/мин и перепаде давления газа от 0,5 до 8 бар. Исследовалось истечение для двух типов сопел: трехсопловое устройство с внутренним диаметром каналов 200 мкм и специально изготовленное сопло с микроканальной кремниевой мембраной толщиной 243 мкм и размером микроканалов 10×10 мкм². Обнаружена закономерность зависимости угла от соотношения расхода жидкости и перепада давления газа. Газокапельное течение по характеру линий можно разделить на три типа зависимостей: для малых (0,5–1 бар), умеренных (2–4 бар) и больших перепадов давления (5–7 бар). При малых перепадах давления угол распыла уменьшается с увеличением расхода жидкости. Для умеренных перепадов давления угол распыла варьирует в диапазоне от 20° до 35° при изменении расхода воды Q от 5 до 40 мл/мин. Для больших перепадов давления угол распыла имеет ярко выраженный локальный максимум в районе 20 мл/мин. Похожую зависимость можно наблюдать для зависимости угла распыла от перепада давления при варьировании расхода жидкости. При малых расходах воды и умеренных расходах HFE-7100 угол распыла уменьшается с увеличением перепада давления воздуха. Для сопла с кремниевой микроканальной мембраной для жидкости HFE-7100 при относительно малых расходах (1–5 мл/мин) и относительно больших перепадах давления (5–8 бар) было зафиксировано разреженное газокапельное течение с каплями малого размера (по оценкам, размер капель составляет менее 10 мкм).

Список литературы

1. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling. Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 1174–1205.
2. Xu R., Wang G., Jiang P. Spray cooling on enhanced surfaces: A review of the progress and mechanisms // J. Elec. Packaging. 2022. Vol. 144, No. 1. P. 010802-1–010802-21.
3. Luo X., Hu R., Liu S., Wang K. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications // Prog. Energy Combust. Sci. 2016. Vol. 56. P. 1–32.
4. Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E.Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L. Cooling of high-power leds by liquid sprays: challenges and prospects // Appl. Thermal Engng. 2021. Vol. 184. P. 115640-1–115640-22.
5. Gatapova E.Ya., Sahu G., Khandekar S., Hu R. Thermal management of high-power led module with single-phase liquid jet array // Appl. Thermal Engng. 2020. Vol. 184. P. 116270-1–116270-9.
6. Bostanci H., Altalidi S.S., Nasrazadani S. Two-phase spray cooling with HFC-134a and HFO-1234yf on practical enhanced surfaces // Appl. Thermal Engng. 2018. Vol. 131. P. 150–158.
7. Zhou Z. F., Lin Y. K., Tang H. L., Fang Y., Chen B., Wang Y. Heat transfer enhancement due to surface modification in the close-loop R410A flash evaporation spray cooling // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 139. P. 1047–1055.
8. Estes K.A., Mudawar I. Correlation of Sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1995. Vol. 38, No. 16. P. 2985–2996.
9. Hou Y., Liu J., Su X., Qian Y., Liu L., Liu X. Experimental study on the characteristics of a closed loop R134-a spray cooling // Exp. Thermal and Fluid Sci. 2015. Vol. 61. P. 194–200.
10. Chen R.H., Chow L.C., Navedo J.E. Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2002. Vol. 45, No. 19. P. 4033–4043.
11. Hou Y., Liu X., Liu J., Li M., Pu L. Experimental study on phase change spray cooling // Exp. Thermal and Fluid Sci. 2013. Vol. 46. P. 84–88.
12. Surtaev A., Vladyko I., Miskiv N., Serdyukov V., Pavlenko K. Exploring heat transfer efficiency in non-boiling spray cooling // Int. J. Thermofluids. 2023. Vol. 20. P. 100504-1–100504-11.
13. Xiang L., Cheng Y., Yu X., Fan Y., Yang X., Zhang X., Xie B., Luo X. High-performance thermal management system for high-power LEDs based on double-nozzle spray cooling // Appl. Thermal Engng. 2023. Vol. 231. P. 121005-1–121005-10.

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2023 г.,
после доработки — 17 ноября 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.,
при дополнительной доработки — 13 июня 2024 г.*