

УДК 536.242

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ И ИК-ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ АЭРОЗОЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© 2022 г. А. С. Суртаев^{1, 2, *}, А. Д. Назаров^{1, 2}, Н. Б. Миськив^{1, 2}, В. С. Сердюков^{1, 2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

*E-mail: surtaevas@gmail.com

Поступило в редакцию 10.04.2021 г.

После доработки 20.07.2021 г.

Принято к публикации 13.09.2021 г.

Продемонстрирована возможность измерения поля температур, размеров капель жидкости и картины орошения теплообменной поверхности при аэрозольном охлаждении с использованием высокоскоростных ИК-термографии, визуализации и прозрачного нагревательного элемента. Получены новые опытные данные по интенсивности теплообмена, и, в частности, показано, что коэффициенты теплоотдачи при аэрозольном охлаждении в 1.5 раза выше максимальной теплоотдачи при мультиструйном орошении. При этом расход жидкости для аэрозольной форсунки практически в пять раз ниже расхода жидкости при использовании мультиструйной форсунки.

DOI: 10.31857/S0040364422010045

ВВЕДЕНИЕ

Охлаждение двухфазными аэрозольными потоками в последнее время является объектом пристального внимания со стороны исследователей, что связано с широкой областью применения, начиная от создания современного теплообменного оборудования для энергетики, химической промышленности до разработки высокоэффективных систем термостабилизации и охлаждения компонентов электронного оборудования, ракетных сопел, использования в металлургии и т.д. [1–5]. Тем не менее наличие большого набора параметров, влияющих на процесс, и отсутствие достоверной информации об интегральных и локальных нестационарных характеристиках теплообмена приводит к сложности определения основных механизмов отвода тепла от перегретой поверхности и теоретического описания процесса. Так, например, подавляющее большинство исследований теплообмена основывается преимущественно на измерении локальной температуры поверхности, как правило, с использованием термопар или локальных датчиков температуры, обладающих низким временным и пространственным разрешениями. В реальности поле значений коэффициента теплоотдачи неравномерно на поверхности теплообмена [1], поэтому для правильной интерпретации необходимо измерять пространственное распределение коэффициента теплоотдачи при аэрозольном охлаждении. Более того, для определения взаимосвязи между гидродина-

мическими характеристиками двухфазного потока (плотность потока капель, их размер и скорость) и теплообменом для последующего теоретического моделирования требуется проведение комплексных исследований.

В данной работе предложен комплексный подход для определения пространственного распределения коэффициента теплоотдачи и визуализации картины орошения с возможностью измерения основных характеристик газо-капельного потока, включая плотность потока микрокапель, их размеры, а также эволюцию пленки жидкости при столкновении капель с ее поверхностью с использованием высокоскоростных ИК-термографии и визуализации с обратной стороны прозрачного нагревательного элемента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование было проведено на экспериментальном стенде с использованием специальной конструкции нагревательного элемента. Их подробное описание представлено в статье [6]. В качестве тепловыделяющего элемента использовалась сапфировая подложка диаметром 0.05 м и толщиной 0.4×10^{-3} м с напыленным тонкопленочным нагревателем из оксида индия олова (ИТО) толщиной 10^{-6} м и площадью 0.02×0.02 м². Одним из основных преимуществ тонкопленочного ИТО нагревателя является его прозрачность в видимом диапазоне длин волн и непрозрачность в ИК-диапазоне,

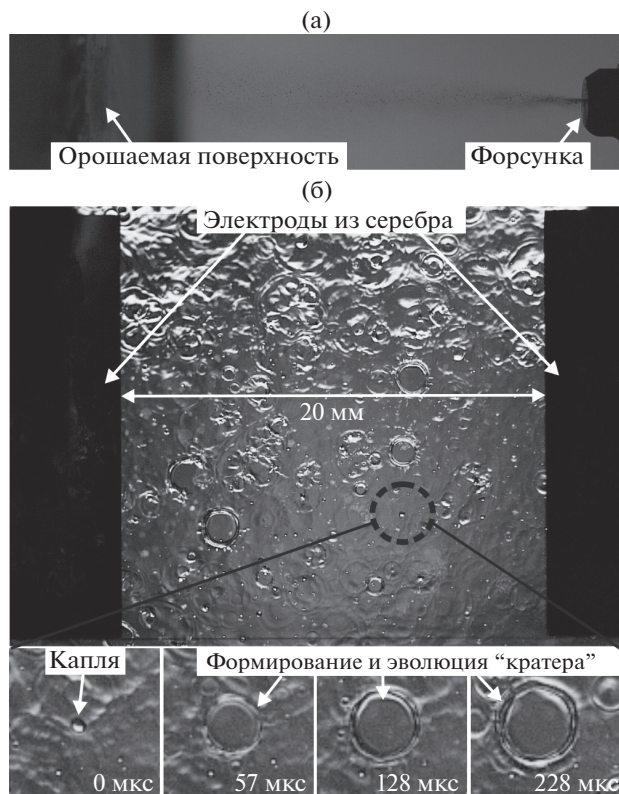


Рис. 1. Кадры высокоскоростной видеосъемки: (а) – теневое изображение формируемого газо-капельного потока, (б) – картина орошения нагревателя и эволюция межфазной поверхности пленки жидкости при соударении с каплей.

что позволяет одновременно регистрировать картину орошения теплообменной поверхности с обратной стороны с использованием высокоскоростной видеосъемки и измерять поле температур поверхности нагревателя с использованием высокоскоростной ИК-термографии. Ранее такая конструкция тепловыделяющего элемента была успешно апробирована для исследования эволюции паровых пузырей и локального температурного поля в области активного центра парообразования при кипении жидкости [7].

Отличительной особенностью настоящего исследования по сравнению с [6] является использование принципиально другого типа форсунки ВКТSS4230 (БКТ Форсунка, Санкт-Петербург) с соплом ВКТ SS422-1, которая генерирует поток мелкодисперсных капель жидкости в виде двухфазной струи. В экспериментах расстояние между форсункой и мишенью выбиралось таким, чтобы весь капельный поток перекрывал площадь тепловыделяющей поверхности. В качестве рабочих фаз использовалась дистиллированная вода и воздух комнатной температуры ($T_0 = 25^\circ\text{C}$). Расход жидкости варьировался в диапазоне $Q = 0.98 \times 10^{-3} - 1.7 \times 10^{-3}$ кг/с и регулировался точ-

ным поддержанием избыточного давления обеих фаз от 10^5 до 3×10^5 Па на входах форсунки.

Для визуализации двухфазного потока на выходе из форсунки и картины орошения тепловыделяющей поверхности в экспериментах использовалась высокоскоростная видеокамера PhantomVEO410. Максимальные частота и разрешение видеосъемки составляли 70 000 кадр/с и 30×10^{-6} м/пикс соответственно. Из кадров, полученных сбоку (рис. 1а), видно, что исследуемая форсунка формирует поток с факелом распыла в виде полного конуса. При этом характер распыла существенно отличается от мультиструйного капельного потока, генерируемого форсункой Bosch EV14L [6]. Анализ визуализации показывает, что при данном типе видеосъемки с относительно низким пространственным разрешением удастся измерить лишь размеры крупных капель и их скорость, при этом диаметр капель для аэрозольной форсунки значительно меньше по сравнению с каплями, формируемыми при мультиструйном распылении [6].

Картину орошения тепловыделяющей поверхности можно визуализировать с использованием видеосъемки с обратной стороны прозрачного нагревательного элемента (рис. 1б). Аэрозоль практически равномерно орошает всю зону тепловыделения с образованием на поверхности пленки жидкости, непрерывно бомбардируемой микрокаплями. Наблюдаемая картина значительно отличается от картины орошения при использовании мультиструйной форсунки [6], когда отчетливо прослеживаются зоны с различной толщиной пленки и скоростью жидкости в ней. Более того, как показал детальный анализ кадров визуализации, данный формат съемки позволяет идентифицировать попадание отдельных микрокапель на поверхность пленки, что дает возможность оценить плотность потока капель на различных участках орошаемой поверхности, а также проследить эволюцию межфазной поверхности пленки жидкости при бомбардировке каплями. В частности, продемонстрировано, что при попадании капель с размерами $d \geq 0.1 \times 10^{-3}$ м в пленке жидкости формируются крупные "кратеры", глубина которых сопоставима с толщиной этой пленки. Также вследствие высокого пространственного и временного разрешения данного формата съемки и особенностей фокусировки удастся идентифицировать и измерить размеры микрокапель ($d = 0.04 \times 10^{-3} - 0.2 \times 10^{-3}$ м) перед непосредственным их соударением с поверхностью пленки жидкости. Поэтому такой формат съемки является перспективным методом для измерения диаметра капель аэрозоля малого размера и в некоторых задачах может служить альтернативой таким современным методам, как, например, IPI (interferometric particle imaging) [8–10].

Для измерения поля температур тепловыделяющей поверхности в исследовании была использова-

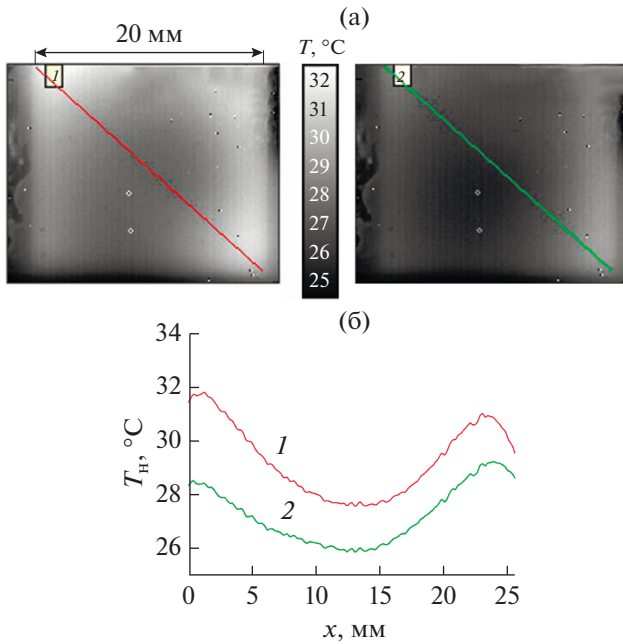


Рис. 2. Кадры ИК-термографии поверхности нагревателя (а) и распределение температуры вдоль линий, указанных на кадрах ИК-съемки (б) при различных расходах жидкости ($\Delta p_a = 3 \times 10^5$ Па): 1 – $Q = 0.98 \times 10^{-3}$ кг/с, 2 – 1.7×10^{-3} .

на скоростная ИК-камера FLIR Titanium HD 570M с частотой съемки 1000 кадр/с и разрешением 0.14×10^{-3} м/пикс. Тепловыделение осуществлялось пропусканием постоянного электрического тока через тонкопленочный элемент с использованием источника питания Elektro Automatic PS 8080-60 DT. Плотность теплового потока $q = UI/S$ измерялась по показаниям величин тока I , пропускаемого через нагреватель, и разности потенциалов U между напыленными по краям нагревателя токоподводами из серебра. Неопределенность измерения температуры и плотности теплового потока не превышала 1°C и 3% соответственно.

На рис. 2 представлены кадры ИК-термографии и зависимость температуры поверхности вдоль диагонали тепловыделяющей области при различных расходах жидкости (0.98×10^{-3} и 1.7×10^{-3} кг/с) при заданном избыточном давлении по газу $\Delta p_a = 3 \times 10^5$ Па. Показано, что в отличие от мультислойного орошения [6] распределение температуры при аэрозольном охлаждении является более равномерным. Безусловно, наблюдается некоторая разница в значениях температуры поверхности в центре и по периферии. Данный факт может быть обусловлен как неравномерным распределением плотности потока капле по сечению факела распыла, что подтверждается предварительными оценками, так и неравномерным полем скоростей газа вблизи поверхности пленки жидкости, но эта разница не превышает 5°C .

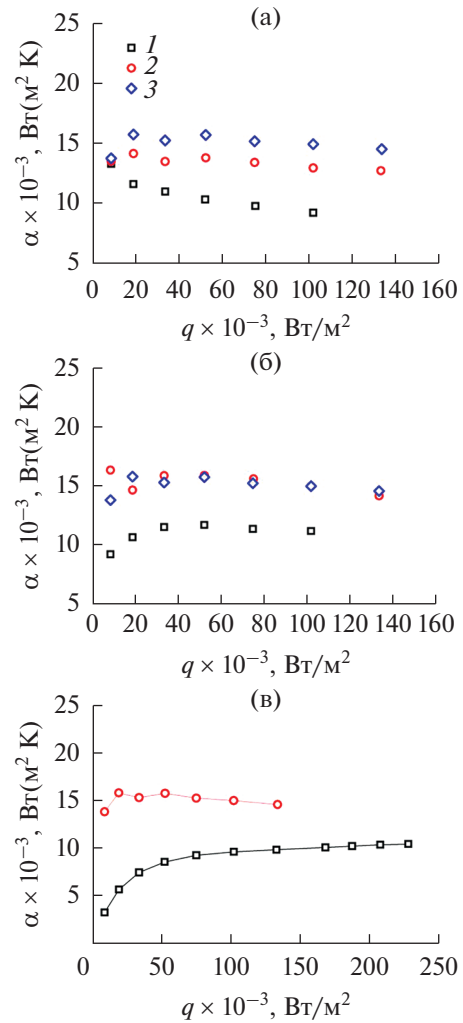


Рис. 3. Зависимость КТО α от q при аэрозольном охлаждении при изменении расходов: (а) – жидкости, $\Delta p_a = 3 \times 10^5$ Па, 1 – $G = 0.98 \times 10^{-3}$ кг/с, 2 – 1.3×10^{-3} , 3 – 1.7×10^{-3} ; (б) – газа, $G = 1.7 \times 10^{-3}$ кг/с, 1 – $\Delta p_a = 10^5$ Па, 2 – 2×10^5 , 3 – 3×10^5 ; (в) – сравнение КТО для наиболее эффективных режимов мультислойного и аэрозольного охлаждения; 1 – результаты [6] при $Q = 8.2 \times 10^{-3}$ кг/с; 2 – результаты данной работы при $Q = 1.7 \times 10^{-3}$ кг/с, $\Delta p_a = 3 \times 10^5$ Па.

С использованием результатов тепловых измерений были определены коэффициенты теплоотдачи $\alpha = q/(T_n - T_0)$ (КТО) в зависимости от плотности теплового потока и расходов жидкой и газовой фазы (рис. 3а, 3б). Для расчетов КТО проводилось осреднение температурного поля нагревателя по площади и времени. В качестве начальной температуры выбиралась температура нагревателя при подаче аэрозоля без нагрева. Значения КТО (рис. 3а) существенным образом зависят от расхода жидкости, что связано со значительным изменением плотности потока ка-

пель, бомбардирующей поверхность пленки, и их скорости. Так, при расходе жидкости 1.7×10^{-3} кг/с ($\Delta p_a = 3 \times 10^5$ Па) интенсивность теплообмена может быть в 1.5 раза выше, чем при расходе 0.98×10^{-3} кг/с. Достаточно сильное влияние на интенсивность теплообмена оказывает расход газовой фазы: увеличение КТО в 1.5 раза при изменении избыточного давления с 10^5 Па до 2×10^5 Па (рис. 3б). В то же время дальнейшее увеличение Δp_a до 3×10^5 Па при заданном расходе жидкой фазы уже не влияет на интенсивность охлаждения. Показано, что в целом наблюдается тенденция слабого снижения величины КТО с ростом теплового потока. Однако уменьшение интенсивности теплообмена, как правило, не превышает 15% в диапазоне тепловых потоков до 0.13×10^6 Вт/м². Максимальная интенсивность теплообмена наблюдается при максимальном расходе жидкости $Q = 1.7 \times 10^{-3}$ кг/с и $\Delta p_a = (2-3) \times 10^5$ Па, а коэффициент теплоотдачи достигает величины $\alpha = 16 \times 10^3$ Вт/(м² К).

На заключительном этапе было проведено сравнение эффективности охлаждения при аэрозольном орошении с использованием описанной в работе форсунки ВКТSS4230 с результатами по теплообмену при мультиструйном охлаждении, опубликованными в работе [6]. На рис. 3в представлены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных типов форсунок. Из графиков видно, что для аэрозоля максимальная интенсивность теплообмена практически в 1.5 раза выше максимальной теплоотдачи, наблюдаемой при мультиструйном охлаждении в диапазоне тепловых нагрузок до 0.15×10^6 Вт/м². В то же время максимальный расход жидкости при аэрозольном охлаждении практически в 5 раз ниже расхода жидкости при использовании мультиструйной форсунки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана методика одновременного измерения характеристик газо-капельного потока и его взаимодействия с орошаемой поверхностью, а также пространственного распределения коэффициента теплоотдачи при аэрозольном охлаждении с использованием высокоскоростных ИК-термографии, видеосъемки и специальной конструкции прозрачного нагревательного элемента на основе ИТО-пленки. Показано, что использование высокоскоростной видеосъемки с обратной стороны позволяет оценить плотность потока микрокапель и измерить их размеры, а также проследить эволюцию волновых возмущений, формирующихся в пленке жидкости при бомбардировке в процессе аэрозольного орошения тепловыделяющей поверхностью. С использованием ИК-термографии продемонстрировано, что при аэрозольном охлаждении коэффициент теплоотдачи более равномерно распределен по

площади нагрева по сравнению с мультиструйным охлаждением, описанным в исследовании [6]. Более того, продемонстрировано, что при использовании аэрозольной форсунки максимальная интенсивность теплообмена практически в 1.5 раза выше максимальной теплоотдачи, наблюдаемой при мультиструйном охлаждении в диапазоне тепловых нагрузок до 0.15×10^6 Вт/м². При этом максимальный расход жидкости для аэрозоля практически в пять раз ниже расхода жидкости при использовании мультиструйной форсунки.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-48-543015 и в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1).

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 Mass Transfer.* 2017. V. 115. P. 1174.
2. *Wang J.X., Guo W., Xiong K., Wang S.N.* Review of Aerospace-Oriented Spray Cooling Technology // *Prog. Aeronaut. Sci.* 2020. V. 116. P. 100635.
3. *Zhao X., Yin Z., Zhang B.* Experimental Study on Transient Heat Transfer Characteristics of Intermittent Spray Cooling // *Exp. Heat Transfer.* 2020. V. 33. № 7. P. 613.
4. *Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С.* Исследование осаждения мелкодисперсных капель воды из двухфазного потока при обтекании коротких плоских профилей в условиях впрысков перегретой воды // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 3. С. 439.
5. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // *ТВТ.* 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
6. *Nazarov A.D., Miskiv N.V., Surtayev A.S., Serdyukov V.S.* Characterization of Multi-Jet Cooling Using High-Speed Visualization and IR Thermography // *J. Eng. Therm.* 2019. V. 28. № 4. P. 489.
7. *Сердюков В.С., Суртаев А.С., Павленко А.Н., Чернявский А.Н.* Исследование локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями при кипении жидкостей // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 4. С. 563.
8. *Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М.* Интерферометрический метод измерения диаметров капель // *Теплофизика и аэромеханика.* 2011. Т. 18. № 1. С. 1.
9. *Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R.* Drawbacks of GPT and IPI Measurements in Dense Sprays // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2019. V. 103. P. 29.
10. *Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharyov O.V.* Study of Liquid Hydrocarbons Atomization by Supersonic Air or Steam Jet // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 163. P. 114400.