

03

Испарительное охлаждение импульсным спреем бинарного раствора этанола и воды

© П.Н. Карпов¹, А.Д. Назаров¹, А.Ф. Серов^{1,2}, В.И. Терехов^{1,2}

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

² Новосибирский государственный технический университет

E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при импактном натекании многоструйного импульсного спрея на вертикальную поверхность. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор этилового спирта в диапазоне массовых концентраций $K_1 = 0-96\%$. Длительность импульса подачи составляла $\tau = 2, 4$ и 10 ms при частоте их следования 10 Hz. Показано, что максимум коэффициента теплоотдачи достигается при содержаниях этанола $50-60\%$, а термический КПД спрея возрастает по мере увеличения концентрации спирта и сокращения длительности импульса.

Одним из эффективных методов охлаждения теплонапряженных изделий является использование газочапельных струй — спреев. При этом для охлаждения больших поверхностей используются многоструйные системы [1–3]. Большими возможностями для управления процессами теплообмена обладают спреи с периодической подачей капельной фазы. За счет изменения длительности импульсов и частоты их следования можно добиться оптимальных режимов испарительного охлаждения при минимизации расхода жидкой фазы. Этой проблеме в последнее время уделяется все более пристальное внимание [4–6]. Важным моментом при создании подобных систем является также оптимальный подбор геометрических и расходных параметров спрея, а также состава жидкости. Следует отметить, что в большинстве имеющихся работ использовались чистые жидкости и преимущественно вода, как наиболее распространенный теплоноситель. В то же время при испарении многокомпонентных и в частном случае бинарных смесей за счет разницы летучести составляющих и теплоты их фазового перехода удастся реализовать различные сценарии развития процес-

сов теплообмена — как значительной интенсификации, так и снижения скорости испарения. Об этом свидетельствуют данные по испарению одиночных капель бинарных растворов [7,8], стекающих пленок жидкости [9], а также многокомпонентного спрея топлива сложного состава [10,11]. Так по опытным данным [12,13] при кипении водных растворов бутилового и этилового спирта в области концентраций более летучего компонента спирта $K_1 = 15\text{--}30\%$ критический тепловой поток возрастает практически в два раза по сравнению с чистой водой. Дальнейшее увеличение содержания спирта приводит к снижению критической плотности теплового потока и для чистого спирта эта величина может снизиться в несколько раз. В работе [12] при кипении на вертикальной пластине в области малых концентраций этанола ($\sim 2\text{--}3\%$) обнаружено заметное снижение критической плотности теплового потока.

Все отмеченные особенности протекания фазовых переходов в бинарных жидкостях не позволяют в настоящее время составить целостную картину процессов теплообмена в спреях бинарных жидкостей. Задача в значительной мере усложняется и за счет нестационарной импульсной подачи жидкой фазы.

Для более глубокого понимания физики протекающих аэродинамических и теплообменных процессов были проведены экспериментальные исследования теплообмена импульсного многоструйного спрея при натекании его на вертикальную изотермическую поверхность. Основное внимание в данной работе уделено изучению влияния состава бинарного раствора этанола в воде на интенсивность теплообмена и эффективность спрея при вариации длительности импульса подачи жидкой фазы.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она состоит из двух жидкостных контуров — теплообменника и источника спрея. Основой первого контура является цифровой калориметр с теплообменником; второй контур — программируемый управляемый источник импульсного спрея с отдельной подачей жидкой и газовой фаз. Установка обеспечена специальными улавливающими системами для измерения расхода и температуры жидкого аэрозоля и стекающей с рабочей поверхности жидкости.

Управляемый источник газокapельной струи конструктивно выполнен в виде двухкамерного блока: для воздуха и воды. На плоской части источника расположены 16 жидкостных форсунок в виде матрицы 4×4

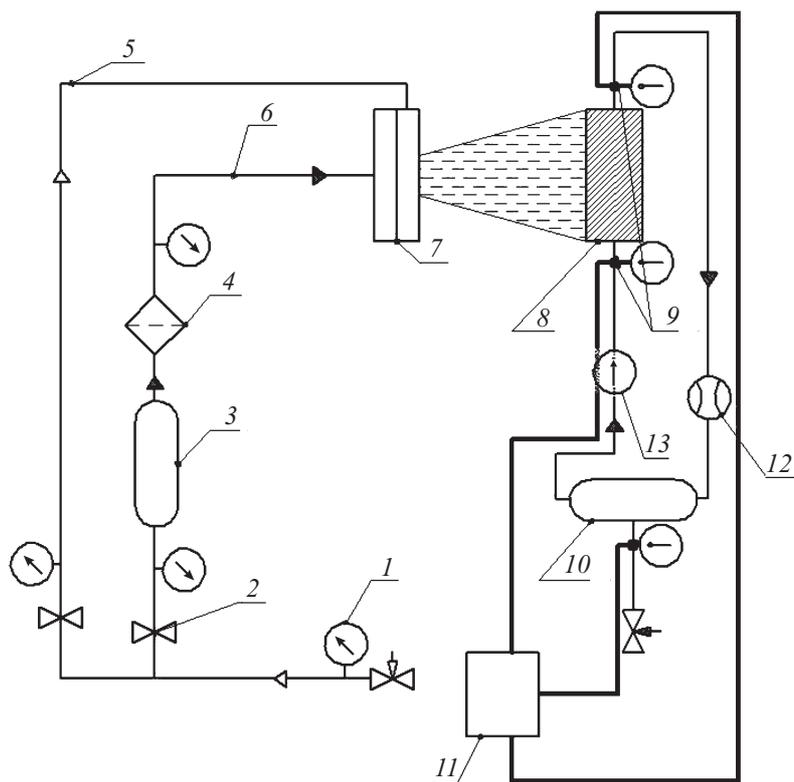


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — манометр, 2 — вентиль, 3 — емкость для жидкости, 4 — фильтр, 5 — воздушная магистраль, 6 — водяная магистраль, 7 — блок форсунок, 8 — рабочая поверхность, 9 — температурный датчик, 10 — бак, 11 — блок управления, 12 — расходомер, 13 — насос, — — элементы трубопровода, - - - элементы электросистемы.

с расстоянием между ними 30 mm. Жидкостная форсунка представляет собой распылитель из четырех сопел диаметром 125 μm , включаемых одним электромагнитным клапаном. На этой же поверхности для создания газочапельного воздушного потока установлены 25 газовых сопел с диаметром выходного отверстия 0.3 mm. Скорость воздушного потока на расстоянии 40 mm от форсунок в опытах оставалась неизменной и равной 8 m/s.

Теплообменник, выполненный из высокотеплопроводной меди, с размерами рабочей поверхности (140×140) mm и толщиной 25 mm нагревался циркулирующей водой из системы термостабилизации. В опытах было реализовано граничное условие $T_W = 70^\circ\text{C} = \text{const}$.

Проведенные оценки показали, что суммарная погрешность измерения интегрального коэффициента теплоотдачи находилась в пределах 1.5–3%.

В серии экспериментов плоскость теплообменника и выход источника аэрозоля были установлены вертикально на расстоянии 230 mm друг от друга. При таком расположении в сечении установки теплообменника источник импульсного газочапельного потока формирует двухфазный поток площадью 300×300 mm². Калиброванные воздушные сопла позволили получить равномерность распределения газовой фазы в окрестности теплообменника не хуже 5%.

Средний по поверхности теплообменника коэффициент теплоотдачи для h (W/m² · К) определялся как

$$h = Q_T / F_T (T_W - T_S),$$

где Q_T — тепловая энергия (W), подводимая к теплообменнику; F_T — его площадь (m²), T_W , T_S — температуры (K) теплообменной поверхности и жидкости, подаваемой в форсунки.

Опыты были проведены во всем диапазоне изменения концентраций этанола в воде $K_1 = 0$ –96% и длительностях импульсов подачи жидкости 2, 4 и 10 ms при частоте их следования 10 Hz, что соответствовало массовому расходу жидкости капельной фазы $j_w = 0.0397, 0.0717, 0.173$ kg/m²s, приходящейся на единицу поверхности теплообменника. Результаты измерения коэффициентов теплоотдачи спрея для указанных условий представлены на рис. 2. Как видно, интенсивность теплообмена сильно зависит от длительности импульса и по мере его увеличения коэффициент теплоотдачи в целом возрастает. Это обусловлено, прежде всего, увеличением интегральной величины расхода орошаемой жидкости, который в опытах был пропорционален длительности импульса. Для чистой воды увеличение более чем в 4 раза расхода жидкой фазы (при длительности импульсов $\tau = 2$ и 10 ms соответственно расход $j_w = 0, 0397$ kg/m² · s и $j_w = 0.173$ kg/m² · s) приводит к интенсификации теплообмена всего на ~ 50%. Для водно-спиртовых растворов эффект интенсификации становится еще меньше, а при длительности $\tau = 4$ ms результаты измерений практически совпадают

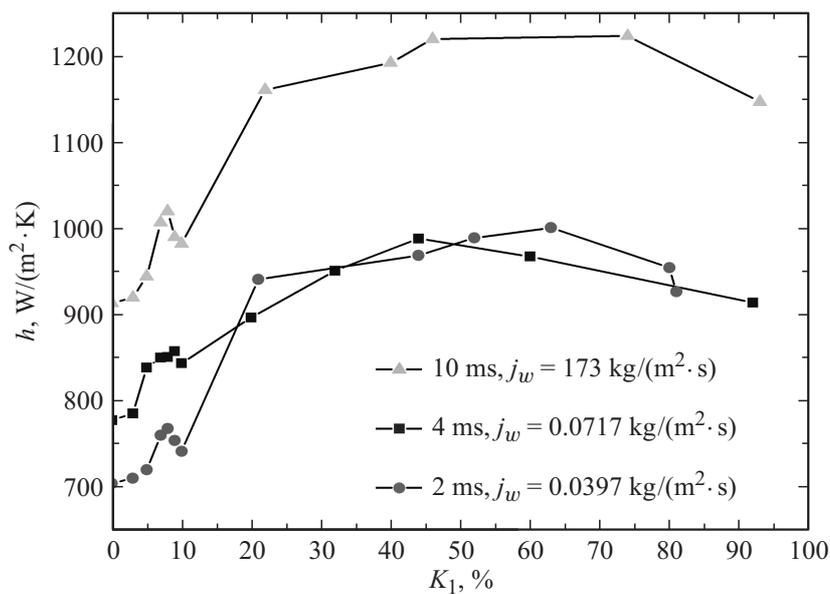


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от концентрации водно-спиртового раствора.

с данными для $\tau = 2$ ms. Это объясняется поведением жидкой фазы на поверхности теплообменника. При малых длительностях открытия клапана ($\tau = 2$ ms), как показали результаты скоростной видеосъемки, имеет место режим испарительного теплообмена, когда жидкостная часть спрея, попав на поверхность теплообмена, успевает испариться до прихода следующей порции жидкости. Для длительности импульса равного 10 ms на поверхности теплообменника режим испарительного охлаждения переходит в режим пленочного охлаждения. При промежутке между ними наблюдаются режимы с сухими пятнами и ручейковыми течениями.

Отметим главный вывод, который следует сделать по рис. 2. Все опытные кривые независимо от длительности импульсов подачи спрея при величине концентрации этанола в растворе $K_1 = 50$ демонстрируют максимум коэффициента теплоотдачи — 60%. При этом теплообмен для этанола заметно выше, чем для чистой воды, несмотря на более высокие значения скрытой теплоты парообразования у воды

по сравнению с этанолом (2750 и 970 kJ/kg соответственно). Такое поведение коэффициента теплоотдачи объясняется как гидродинамическими особенностями взаимодействия капельной фазы с теплообменной поверхностью, так и различием теплофизических свойств компонентов смеси. Действительно, при малых содержаниях спирта из-за низкой фугитивности паров воды скорость испарения невелика. Постепенное увеличение содержания этанола ускоряет процесс парообразования и теплоотдача соответственно возрастает. В области высокого содержания спирта ($K_1 > 50\text{--}60\%$) определяющее влияние начинает оказывать более низкий уровень теплоты фазового перехода этанола, что с увеличением концентрации этанола в итоге приводит к снижению интенсивности теплообмена.

Параметром, характеризующим степень производительности спрей-системы, является ее тепловая эффективность. В общем случае она равна отношению интегрального потока тепла через теплообменник к суммарной величине энтальпии системы [14]:

$$\eta = \frac{q}{m[C_p(T_w - T_s) + r]},$$

где q — плотность теплового потока (W/m^2), m — удельный массовый расход ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), C_p — удельная теплоемкость ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), T_w , T_s — температуры теплообменной поверхности и жидкости (К), r — скрытая теплота парообразования жидкой фазы (J/kg). Теплофизические свойства смеси этанол-вода определялись из условия аддитивного влияния компонентов бинарного раствора [14]:

Опытные данные тепловой эффективности спрея в зависимости от состава жидкости и при различных длительностях импульса представлены на рис. 3. В отличие от данных о коэффициенте теплоотдачи на рис. 2, у параметра η наблюдается последовательный рост при увеличении длительности импульса, в отличие от коэффициента теплоотдачи, где кривые для $\tau = 2$ и 4 ms очень близки и наблюдается практически линейное увеличение с ростом концентрации этанола. При этом наибольшее значение у параметра η при самом коротком импульсе $\tau = 2 \text{ ms}$. Это говорит о том, что в данном случае большая часть капельной фазы, достигающей теплообменной поверхности, успевает испариться до прихода следующей порции жидкости.

Из рисунка видно, что концентрация спирта совершенно иным образом сказывается на параметре тепловой эффективности η , нежели

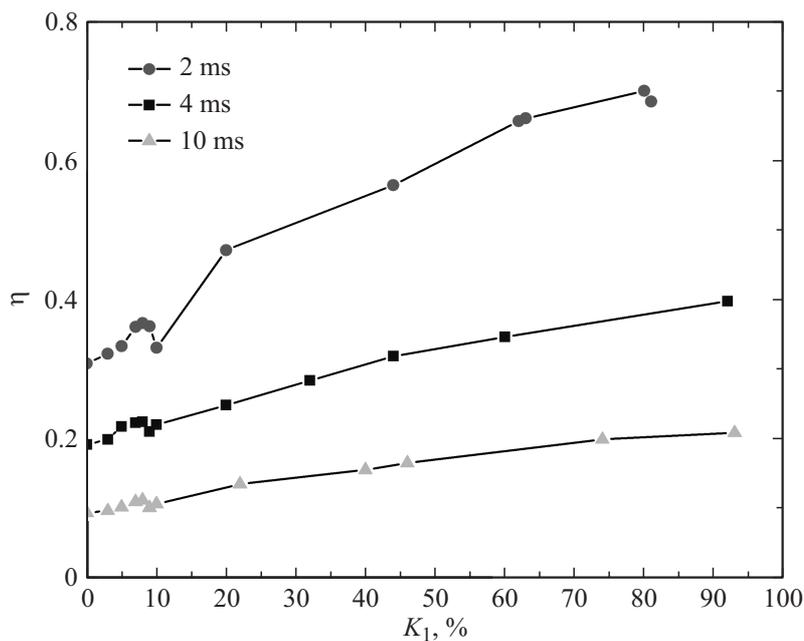


Рис. 3. Параметр тепловой эффективности водно-спиртового раствора.

на коэффициенте теплоотдачи. Действительно, зависимость $\eta = f(K_1)$ не имеет экстремума и непрерывно возрастает по мере увеличения содержания этанола в растворе и достигает максимума для чистого спирта. Причем эта тенденция наблюдается при всех исследованных длительностях импульса, что говорит о более высокой степени утилизации энергии охлаждающей жидкости, когда в качестве теплоносителя используется этанол, по сравнению с водой. Как видно, кпд спрей-охлаждения при импульсном способе охлаждения может достигать больших значений и особенно при малых временах импульса и при использовании в качестве охлаждающей жидкости этанола. Совершенно очевидно, что при других значениях температуры поверхности картина процесса теплообмена может кардинальным образом измениться, поэтому для выяснения этого вопроса необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, обнаружено, что при концентрации спирта в смеси $K_1 \sim 50\text{--}60\%$ коэффициент теплоотдачи имеет максимум. При этом,

несмотря на более высокий уровень скрытой теплоты парообразования у воды, коэффициент теплоотдачи при ее распылении, оказался ниже, чем при использовании чистого спирта. Параметр тепловой эффективности спрея возрастает по мере сокращения длительности импульсов подачи жидкой фазы и увеличения содержания этанола в бинарной смеси охлаждающей жидкости. Показаны направления оптимизации процесса спрей-охлаждения поверхностей теплоносителя с помощью импульсного метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 14-09-00402).

Список литературы

- [1] *Mohammadpour J., Zolfagharian M.M.* et al. // *Int. J. Thermal Sci.* 2014. V. 86. P. 139–147.
- [2] *Xie J.L., Tan Y.B.* et al. // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* 2014. V. 78. P. 1177–1186.
- [3] *Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И., Шаров К.А.* // *ИФЖ.* 2009. Т. 82. № 6. С. 1160–1166.
- [4] *Zhang Z., Jiang P.-X., Hu Y.-T., Li J.* // *Exp. Heat Transfer.* 2013. V. 26. P. 453–469.
- [5] *Pana ̃o M.R.O., Moreira A.L.N.* // *Int. J. Heat and Fluid Flow.* 2009. V. 30. P. 117.
- [6] *Pavlova A.A., Otani K., Amitay M.* // *Int. J. Heat and Fluid Flow.* 2008. V. 29. P. 131.
- [7] *Терехов В.И., Шишкин Н.Е.* // *Теплофизика и аэромеханика.* 2009. № 2, С. 253–259.
- [8] *Sazhin S.S., Elwardany A.* et al. // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* 2010. V. 53. P. 4495–4505.
- [9] *Arias-Zugasti M., Rosner D.E.* // *Combust. & Flame.* 2003. V. 135. P. 271–284.
- [10] *Pana ̃o M.R.O., Moreira A.L.N.* // *Experiments in Fluids.* 2004. V. 37. P. 834–855.
- [11] *Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С., Москвичева В.Н.* // *ПМТФ.* 1962. № 4. С. 108–111.
- [12] *Бобрович Г.И., Кутателадзе С.С.* // *ПМТФ.* 1964. № 2. С. 146–149.
- [13] *Kim J.* // *Int. J. Heat and Fluid Flow.* 2007. V. 28. P. 753–767.
- [14] *Стабников В.М., Ройтер И.М., Процюк Т.Б.* *Этиловый спирт.* М.: Пищепромиздат, 1976. 268 с.