

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПУТНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА НА
ТЕПЛООБМЕН ИМПУЛЬСНОГО СПРЕЯ**

В.И. Терехов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

terekhov@itp.nsc.ru; nazarov@itp.nsc.ru; serov@itp.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена импульсного газокапельного потока с плоским нагревателем. Показано влияние режима формирования капельной массы, скорости спутного потока воздуха на локальный и интегральный теплообмен.

В технологических процессах таких областей промышленности, как теплоэнергетика, металлургия, аэрокосмическая и многие другие, широко применяют газокапельный поток (аэрозоль). В некоторых случаях газокапельный поток генерируется для оптимальной организации физико-химического процесса сгорания топлива в энергоустановках, в двигателях ориентации космических аппаратов и других объектах современных энерготехнологий. Газокапельный поток широко используется также для увлажнения атмосферы в системах кондиционирования воздуха и охлаждения заготовок и различных поверхностей, для нанесения пленок и лакокрасочных покрытий.

Газокапельные потоки широко используются в технике из-за высокой интенсивности процессов теплопереноса. Одно из новых направлений по интенсификации теплообмена стало создание систем на основе пульсирующих и сканирующих потоков. В основу систем положены результаты теоретических и экспериментальных работ по изучению, как самой газокапельной струи, так и процессов ее периодического взаимодействия с охлаждаемыми поверхностями [1-5]. Основные направления этих исследований были нацелены на изучение влияния гармонической модуляции геометрии потока спрея на его газодинамическую структуру и возможность управлением коэффициентом теплоотдачи. Изучалось воздействие на спрей механических модуляторов, пьезо-электрических активаторов [4], а также акустического поля

[5]. Для улучшения внутрикамерных процессов энергетических установок значительный интерес вызывают работы по прерывистым спреям с горением [6,7].

Подавляющее число работ по охлаждению с помощью газочапельных потоков посвящено режимам с кипением [1, 8, 9], что объясняется широким использованием капельного охлаждения в металлургии и атомной энергетике. Однако существует широкий круг задач связанный с охлаждением газочапельным потоком тел с температурой ниже точки кипения охлаждающей жидкости. Ряд авторов, для повышения коэффициента теплообмена, применяют различные способы воздействия на воздушно – капельный поток. В этой связи, авторами были выполнены исследования теплообменных процессов при охлаждении импульсным спреем и влияние параметров спутных потоков на теплообмен [10].

Исследовательский стенд состоит из экспериментальной установки, подробное описание которой дано в работах [11, 12]. Основные элементы установки (рис.1): программируемый управляемый источник многоструйного импульсного спрея (1), цифровой калориметр с теплообменником (2) и автоматизированная система регистрации параметров газочапельного потока, расхода охлаждающей жидкости и газа, температуры, давления, теплового потока, локальной толщины и скорости пленки на поверхности теплообменника.

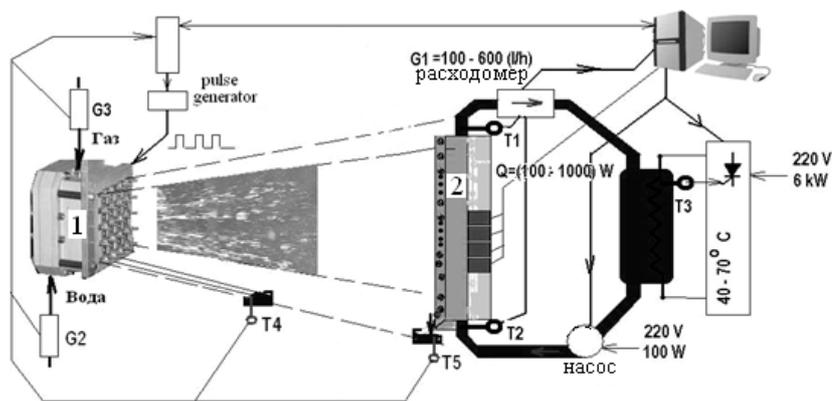


Рис.1. Экспериментальная установка.

1 - программируемый источник спрея, 2 - цифровой калориметр с теплообменником.

$T1, T2$ – термометры входа и выхода теплоносителя; $T3$ – термометр нагревателя;

$T4, T5$ – термометры потока импульсного спрея;

$G1, G2, G3$ – датчики расхода.

Источник газочапельного потока состоит из двух камер: для воздуха и жидкости. На плоской части источника расположены 16 жидкостных форсунок (инжекторы) в виде матрицы 4×4 . На этой же поверхности для создания спутного воздушного потока установлены 25

газовых сопла с диаметром выходного отверстия 0.35 мм. Расход газовой фазы не изменяется во времени и определяется давлением на входе воздушного блока. За счет изменения рабочего давления $P_g = (0 \div 6)$ атм. начальная скорость воздушного спутного потока может варьироваться в диапазоне $(0 \div 20)$ м/с.

Жидкостная форсунка представляет собой распылитель из четырех сопел диаметром 125 мкм, включаемых одним электромагнитным клапаном. Продолжительность и частоту включения можно задавать индивидуально каждому клапану. Расход жидкости и её концентрация на поверхности теплообменника определяется порядком включения клапанов и давлением на входе блока электромагнитных клапанов ($P_L = (0.5 \div 3)$ атм., при этом начальная скорость жидкости в потоке регулируется в диапазоне $0.5 \div 30$ м/с). Изменение длительности ($T_i = (0.002 \div 0.01)$ сек.) и частоты открытия клапана ($F_i = (1 \div 50)$ Гц) позволяют формировать газочапельный поток с заданной плотностью потока жидкой фазы. Каждая из форсунок была протарирована, и по полученным данным определялся общий расход капельной фазы. Инжекторы имеют прямое программируемое управление, что позволяет устанавливать различные режимы сканирования поверхности охлаждаемой жидкостью или создавать локальные охлаждающие потоки на выделенные площади теплообменника.

Теплообменник выполнен из меди с размерами в плане 140×140 мм и толщиной 30 мм. Калориметр построен по принципу регистрации (с относительной погрешностью не более 3%) в динамическом режиме количества теплоты, полученной теплообменным модулем от источника тепловой энергии (максимальная подводимая мощность – 6 кВт). В центре поверхности теплообменника был установлен датчик локального теплового потока [13], для регистрации флуктуации плотности теплового потока во время взаимодействия капельной области импульсной газочапельной струи с поверхностью теплообменника. Теплообменная поверхность располагалась вертикально и стекающая пленка жидкости собиралась в специальный резервуар, что позволяло определять массовый расход неиспарившейся части спрея и, соответственно, количество теплоты, расходуемой на испарение и нагрев пленки жидкости.

В серии экспериментов теплообменник и источник аэрозоли были установлены вертикально к горизонтальной оси. Расстояние между инжектором и теплообменником может меняться. В

данных экспериментах оно было фиксированным и составляло $L = 230$ мм. В опытах поддерживалась постоянная температура поверхности теплообменника ($T_w = \text{const}$), равная $T_w = 70^\circ\text{C}$. Измерения теплообмена проводились при комнатных условиях, показания термогазодинамических параметров фиксировались. Температура воздушной и жидкостной составляющих аэрозоля во время эксперимента изменялась в небольших пределах и составляли: для жидкой фазы (дистиллированная вода) – $(7 - 13)^\circ\text{C}$ и воздуха – $(20 - 22)^\circ\text{C}$. Скорость фаз аэрозоля в зависимости от режима изменялась (воздух – $V_g = (0 - 25)$ м/с; вода – $V_l = (1 - 20)$ м/с).

Для наблюдения за поведением капель при движении к теплообменнику и определения их размера и скорости была проведена съемка спрея высокоскоростной цифровой видеокамерой (максимальная скорость регистрации 7000 видеок кадров в секунду). На рис. 2 приведена фотография цуга капель двух импульсов в пространстве дрейфа между теплообменником и соплом одиночного клапана.

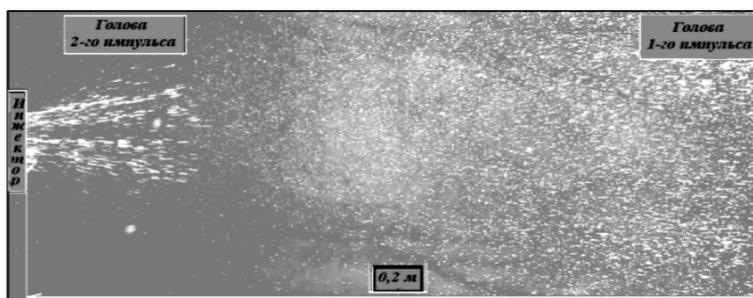


Рис. 2. Визуализация развития импульсного спрея. Время между импульсами – 0.01 с.

Анализ видеоданных показал, что у поверхности теплообменника наблюдаются два основных размера капель: крупные – $120 \div 150$ мкм и мелкие – $45 \div 50$ мкм. При этом капли с малой массой, за счет вязкости воздуха, отстают от капель с большей массой, которые достигают охлаждаемой поверхности в первую очередь. Результаты видео наблюдений дополнялись данными, полученными от локального датчика пульсаций. В измерениях применялся конденсаторный электретный датчик пульсаций диаметром 10 мм с чувствительностью $P = 10$ мВ/Па в диапазоне пульсаций $F_{\text{пульс}} = (50-15000)$ Гц. По данным от датчика пульсаций измерялась скорость цуга по времени дрейфа от сопла до датчика и кинетическая энергия капель. Типичная осциллограмма с локального датчика пульсаций,

установленного на расстоянии 0.21 м от источника, показаны на рис.3. Интервал времени с большими величинами амплитуды («голова» гидроимпульса), соответствует регистрации импульса давления группы крупных капель, который пропорционален произведению массы на скорость ($dP=m_i \cdot V_i$). «Хвост» импульса – соответствует мелким каплям. На рис. 3 импульс управления клапаном для сравнения совмещен с передним фронтом сигнала датчика пульсации.

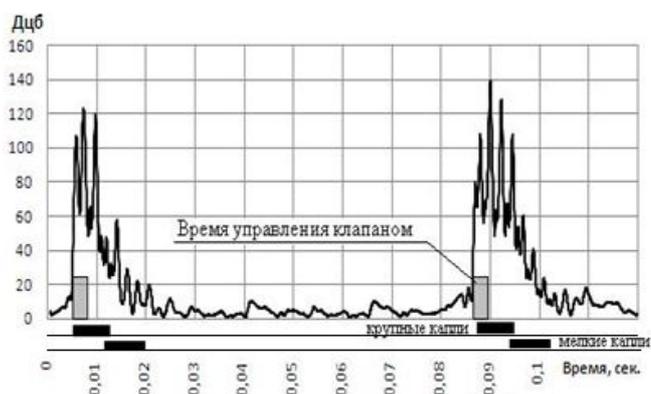


Рис. 3. Осциллограмма сигнала с датчика пульсации давления капельного потока (Длительность импульса клапана $T_u=3$ мс, частота $F_u=10$ Гц, крупные капли (диаметр) $D \sim (120 -150)$ мкм; мелкие капли (диаметр) $d \sim (45-50)$ мкм.).

Осциллограмма подтверждает визуальные наблюдения, что на расстоянии 0.21 м продолжительность гидроимпульса увеличилась в 4 раза по сравнению с длительностью импульса управления (с 0.003 сек. до 0.012 сек).

Эксперименты показали, что по пути следования от источника до теплообменника внутри капельной массы возникают локальные зоны повышенной концентрации частиц жидкости. Этот эффект демонстрируют кривые изменения относительной величины импульса капель спрея полученные локальным датчиком пульсаций на разных расстояниях по пути распространения потока от источника до теплообменника в непрерывном и импульсном режимах его работы при наличии и отсутствии спутного потока воздуха.

Измеренная в опытах удельная величина интегрального значения импульса двухфазного потока представляет собой $K = \frac{1}{\pi R_0^2} (\sum_{i=1}^n m_{p_i} V_{p_i})$, где R_0 – радиус пьезосенсора, а m_{p_i} и V_{p_i} – масса и продольная компонента скорости капли. Анализ опытных данных, представленных на рис. 4, свидетельствует о неравномерности распределения K/K_0 (K_0 – импульс спрея на выходе из сопла). В промежутке между источником и теплообменником имеется общая тенденция к

снижению этого параметра по мере развития спрея, как в непрерывном, так и импульсном режимах формирования. Локальные неоднородности могут быть вызваны перераспределением концентрации капельной фазы, процессами дробления капель и их коалесценцией. Наличие спутного потока воздуха для непрерывного спрея приводит к заметному снижению отношения K/K_0 , что обусловлено усилением процессов смешения спрея с окружающим потоком. В то же время, для импульсного спрея наблюдается ярко выраженный максимум на некотором расстоянии от сопла, что говорит о проявлении эффекта «жгутирования» капель и максимальной группировке капель в этой зоне. Важно, что при иной начальной скорости потока и частотных параметрах спрея область с высокой концентрацией аэрозоля изменяется как по координате, так и амплитуде.

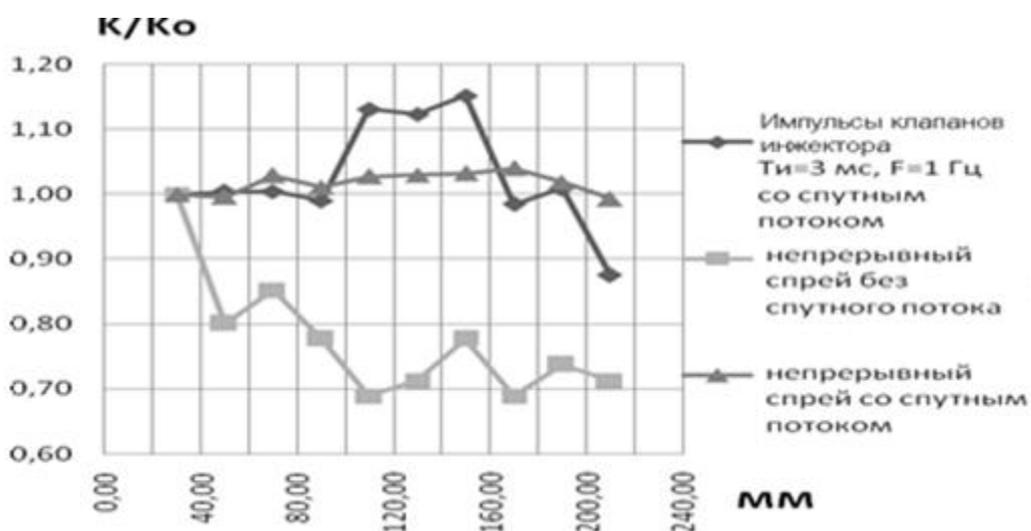


Рис. 4. Распределение относительного импульса потока капель на оси спрея. (K_0 — импульс спрея на выходе из сопла; нулевая координата — источник потока).

Интегральные значения коэффициентов теплоотдачи были получены в режиме установившегося теплового равновесия системы, с помощью цифрового калориметра. Полученные интегральным методом данные демонстрируются на рис.5, где показано семейство зависимостей коэффициента теплоотдачи — H от удельной плотности потока капель — R при разных режимах открытия клапанов источника аэрозоли: $T_i = 0.002$ с ÷ 0.01 с, $F_i = 1$ Hz — 10 Гц. Средний по поверхности теплообменника коэффициент теплоотдачи определялся как $H = Q (f(t_w - t_l))^{-1}$, где Q — тепловая энергия, подводимая к теплообменнику; f — его площадь, а t_w и t_l — температуры теплообменной поверхности и жидкости в потоке спрея. Средняя скорость

воздуха – 8 м/с; соотношение среднемассовых скоростей жидкой и газовой фаз – $\frac{\rho_l V_l}{\rho_g V_g} = 0 \div 0.01$.

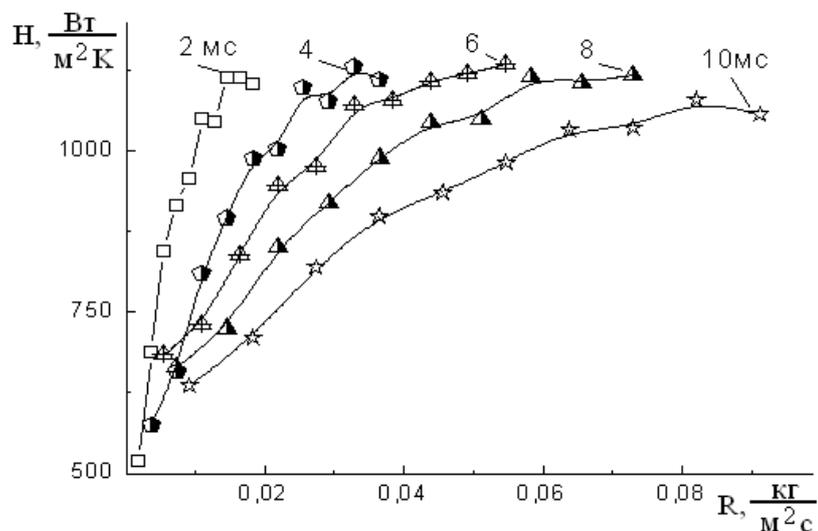


Рис. 5. Влияние длительности импульса на коэффициент теплоотдачи, при охлаждении поверхности газокapельной струей.

В зависимости от длительности импульса опытные данные заметно расслаиваются. Для менее длительных импульсов максимум коэффициента теплоотдачи достигается при значительно меньших скоростях орошения. При этом величина самого максимума практически слабо зависит от скорости орошения. Следовательно, использование коротких импульсов подачи жидкости является более эффективным с точки зрения интенсификации теплоотдачи.

Выше было отмечено, что капельная масса импульсного спрея неоднородна, следовательно, эта неоднородность должна влиять на локальный коэффициент теплопередачи. Наиболее наглядно эффект неоднородности локальной теплопередачи должен проявиться в режиме испарительного охлаждения – режиме, когда жидкостная часть спрея, попав на поверхность теплообмена, успевает испариться до прихода следующей порции.

Для проверки этого предположения на поверхность теплообменной поверхности, в центральной части был установлен локальный датчик теплового потока (д.т.п.) [13], площадью 2.2 мм × 2.2 мм. Сигнал с датчика, имеющий передаточную характеристику равную $S = 67.76 \cdot 10^{-6} \frac{мВм^2}{Втм}$, пропорционален проходящему через поверхность датчика тепловому потоку.

На рис.6 показан локальный тепловой поток $h \left[\frac{Bm}{M^2} \right]$ при орошении теплообменника импульсным газокапельным потоком с частотой следования областей капель 1 Гц, разной протяженности (2 мс, 7 мс, 10 мс) и скоростью 8 м/с в постоянном потоке спутного газа скоростью 5 м/с.

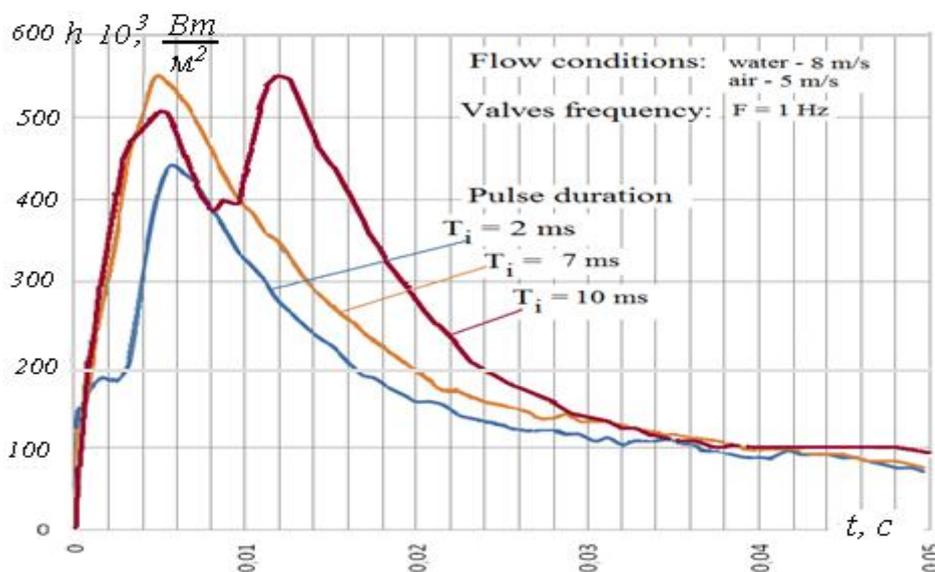


Рис. 6. Влияние скорости орошения и длительности импульса на коэффициент теплоотдачи.

Можно заметить неоднородность локального теплового потока для импульсного спрея при открытии жидкостного клапана на 2 мс и 10 мс. В то же время, при тех же внешних условиях локальный теплообмен однороден при открытии клапана на 7 мс. Причем, для открытия клапанов 2 мс неоднородность имеет место в начале цуга капель, а для открытия 10 мс – тепловой поток имеет два равнозначных максимума. Зафиксированная неоднородность локального теплового потока подтверждает экспериментальные данные о перераспределении частиц жидкости внутри капельного импульса спрея.

На рис.7 приведены типичные кривые локального теплового потока – $h \left[\frac{W}{m^2} \right]$ при разных значениях скорости спутного воздуха для постоянного режима жидкой фазы: скорость 5 м/с, открытие жидкостных клапанов источника - частота $F_i = 1$ Гц, длительность $T_i = 3$ мс. На графике кривые теплового потока расположены последовательно с увеличением скорости спутного воздушного потока.

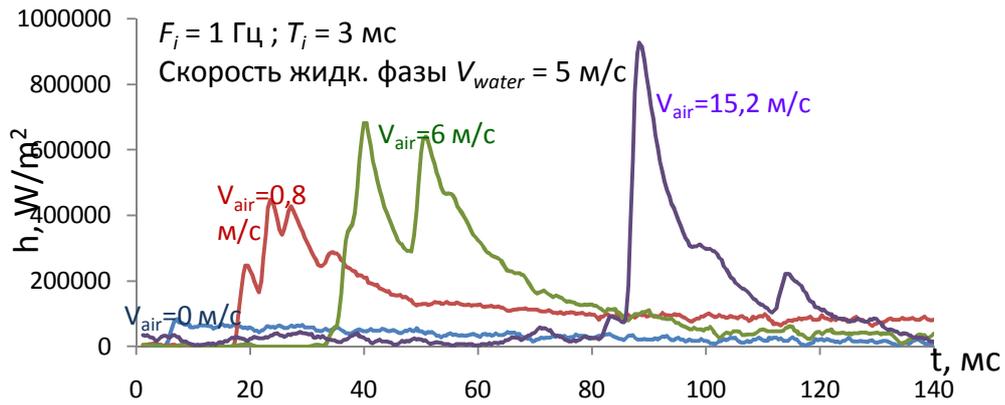


Рис.7. Влияние скорости спутного воздушного потока на локальный тепловой поток.

Из рисунка видно, что даже небольшая скорость спутного газового потока ($V_{air} = 0,8 \text{ м/с}$) существенно увеличивает теплообмен. Анализ экспериментальных данных, показывает, что неравномерность локального теплового потока чаще наблюдается в диапазоне скоростей спутного газового потока от 0 м/с до 8 м/с . При некоторых режимах локальная неоднородность теплового потока может достигать до 50 % от максимального значения (пример – кривая $V_{air} = 6 \text{ м/с}$, рис.7). С увеличением скорости воздуха наблюдается ярко выраженная группировка в голове импульса (см. кривая $V_{air} = 15,2 \text{ м/с}$, рис. 7).

На рис.8 приведены экспериментальные данные влияния спутного воздушного потока на величину интегрального коэффициента теплообмена – $H \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

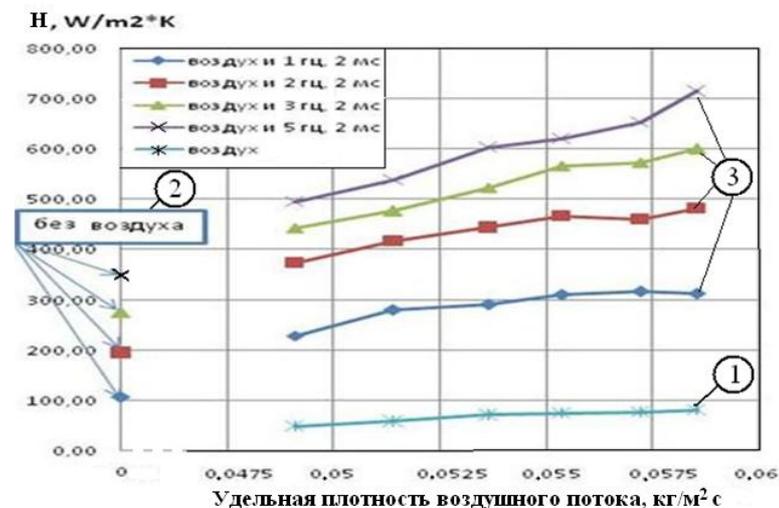


Рис. 8. Влияние спутного потока на интенсивность теплообмена спрея.

При охлаждении импульсным спреем процессы на поверхности теплообменника можно разделить на две основные фазы. Во время первой фазы происходит образование толстой охлаждающей пленки и бомбардировка этой пленки каплями «хвостовой» части импульса. Крупные капли спрея при бомбардировке осажденной жидкостной пленки дробятся от удара и генерируют разнонаправленный поток мелких капель (нанодисперсных частиц), в основном в сторону от поверхности теплообменника. Воздушная фаза подаётся на поверхность теплообменника непрерывным потоком, который удерживает образовавшееся облако нанодисперсной капельной «шубы» на поверхности теплообменника в течение всего цикла капельного импульса. Во второй фазе идет интенсивное испарение толстой пленки и сверхтонкой пленки, образовавшейся в результате осаждения на поверхность мелких капель «хвостовой» части импульса. Описанный процесс подтверждается экспериментальными данными. На графике 1 (рис.8) демонстрируется влияние на коэффициент теплообмена от однофазного воздушного потока. Теплообмен, приходящийся на капельный поток без спутного воздушного потока, показан на графике 2 (обозначение «без воздуха») для режимов с частотой следования капельных областей от 1 Гц до 5 Гц. На графиках 3 показана зависимость теплообмена приходящаяся на газочапельный поток – с частотой следования капельных областей от 1 Гц до 5 Гц и спутным воздушным потоком с увеличивающейся удельной плотностью от $0.04 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ до $0.06 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

На рис.9 точками, обозначенными кружками (\circ), показано увеличение теплообмена за счет воздушного потока относительно уровня теплообмена без него (отношение начальных точек графика 3 к соответствующим точкам графика 2, см. рис.8). Видно, что самый большой вклад ($\sim 100\%$) в теплообмен воздушным потоком данной скорости наблюдается для режима с формированием капельной массы длительностью 2 мс и частотой следования 1 Гц. С увеличением частоты следования капельных областей (см. рис.9), относительный вклад в теплообмен воздушного потока уменьшается. На графике две горизонтальные оси координат: 1 – частота следования капельных импульсов, f [Гц]; 2 – ось с расходом капельной фазы спрея, значения которой соответствуют обозначениям первой оси. Точками, обозначенными квадратами (\square , см. рис.9), показано приращение коэффициента теплообмена от скорости

воздушного потока от минимального до максимального значений для каждого из графиков 3 рис.8.

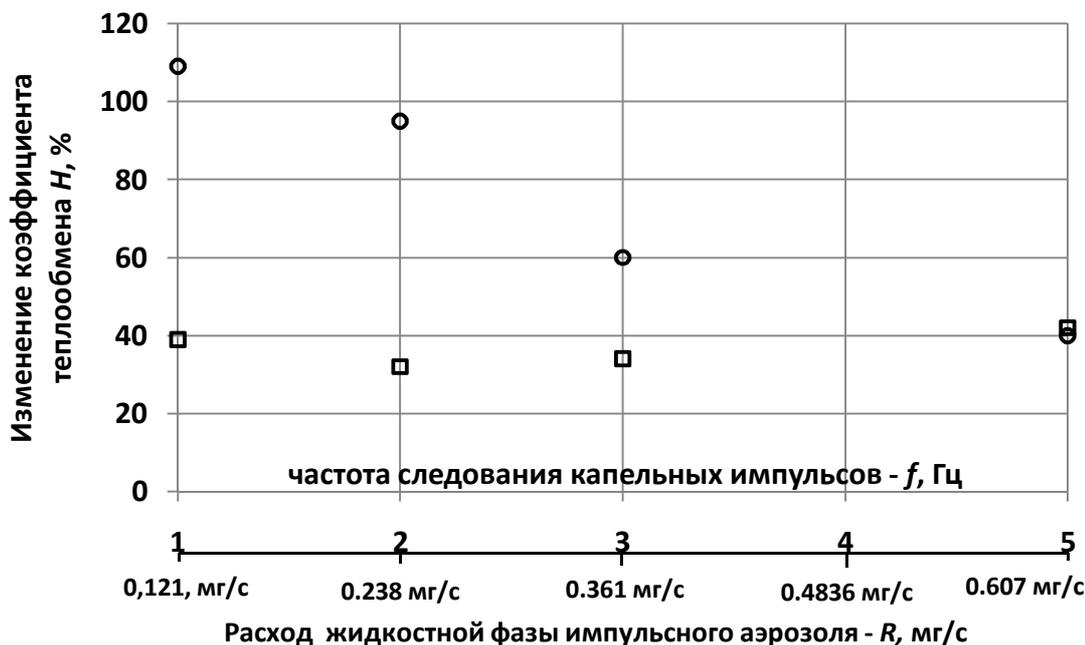


Рис.9. Вклад воздушной спутной струи в теплообмен.

○ – приращение теплообмена от воздушной струи относительно капельного орошения без спутного воздуха; □ – прирост теплообмена при увеличении расхода воздуха от минимального до максимального значений (см. рис.8).

Заключение

Исследование импульсного газочапельного потока оптическим и контактными методами показало наличие неоднородности в распределении капельной массы внутри жидкостной области. При подходе к поверхности теплообменника в «голове» капельной области сосредоточены крупные капли диаметром 120 мкм – 150 мкм. В след за головной частью движутся капли меньшего диаметра (45 мкм – 50 мкм), образуя шлейф всей капельной области.

По пути следования капельной области от источника к теплообменнику внутри цуга наблюдаются области повышенной концентрации капель. На координату и время возникновения таких зон влияют скорость жидкой и газовой фаз, а также режим работы жидкостных клапанов.

Измерения коэффициента теплообмена позволили выявить, что при орошении теплообменника импульсным спреем есть два режима охлаждения: испарительный и

пленочный. Показано, что с точки зрения интенсификации теплообмена выгоднее поддерживать испарительный режим, который достигается периодической подачей небольших порций жидкости на теплообменную поверхность. Причем последовательность капельно-жидкостных областей должна быть такой, чтобы масса жидкости успела испариться с поверхности к моменту прихода следующей порции жидкости.

При испарительном режиме и наличии неоднородности внутри капельной области импульсного спрея на поверхности теплообменника наблюдаются нестационарный локальный тепловой поток. При некоторых режимах неоднородность потока может достигать до 50 % от максимального значения.

Вклад в теплообмен воздушной спутной струи относительно теплообмена без нее уменьшается с увеличением частоты следования капельных областей (расхода жидкости). В зависимости от длительности импульса и частоты повторения потока жидкости эта доля составляла от 10% до 20%. Повышение теплопереноса жидкостью в присутствии воздушного спутного потока увеличивается на ~ 60% (режим 5 Гц, 2 мс, рис.4).

Литература.

- [1] Pavlova A. A., Otani K. and Amitay M. Active control of sprays using a single synthetic jet actuator. *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2008. Vol. 29. pp. 131 – 148.
- [2] Panao M.R.O., Moreira A.L.N. Intermittent spray cooling: A new technology for controlling surface temperature. *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 2009. V.30. pp.117-130.
- [3] Wang D. ,Gandji A.R., Sipperley C.M., Edwards C.F. Effects of Nozzle Geometry and Ambient Pressure on the Characteristics of a Modulated Spray. *AIAA . paper 99-0366*. 1999.
- [4] Pothos S., Longmire E.K. Control of a Particle-Laden Jet Using a Piezo-Electric Actuator. *Proc. 11-th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon. 2002.
- [5] Sujith R.I. An Experimental Investigation of Interaction of Sprays with Acoustic Fields. *Exp. Fluids*. 2005. V.38. pp. 576-587.
- [6] Zhu M., Dowling A.P., Bray K.N.C. Forced Oscillations in Combustion with Spray Atomizers. *J. Eng. Gas Turbine Power*. 2002. V. 124. pp. 20-30.

- [7] Dubey R.K., Black D.L., McQuay M.Q., Carvalho Jn.J.A. The effect of Acoustic on an Ethanol Spray Flame in a Propane-Fired Pulse Combustor. *Combust. Flame*. 1997. V.110. pp. 25-39.
- [8] Yang J. D., Chow L. C. and Pais M. R. Nucleate boiling heat transfer in spray cooling. *J. Heat Transf.* 1996. Vol. 118. pp. 255 – 258.
- [9] Tianshu L. and Sullivan J.P. Heat Transfer and Flow Structures in an Excited Circular Impinging Jet. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1996. Vol. 39, No. 17. pp. 3695 – 3706.
- [10] Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И., Шаров К.А. Экспериментальное исследование испарительного охлаждения импульсным спреем. *Инженерно-физический журнал*. 2009. Т.82, №6. с.1160-1166.
- [11] Назаров А.Д., Серов А.Ф., Бодров М.В. Интенсификация охлаждения импульсным газокапельным потоком. Аппаратура, параметры, результаты. *ЖТФ*. 2010. Т.80, №5. – С.132-135.
- [12] Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Структура импульсной распыленной струи при изменении ее частотных характеристик. *Теплофизика высоких температур*. 2011. Т. 49, № 1. с. 116-121.
- [13] Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока. Санкт - Петербург, 2003.