

03;12

Интенсификация охлаждения импульсным газочапельным потоком. Аппаратура, параметры, результаты

© А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, М.В. Бодров

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: nazarov@itp.nsc.ru; serov@itp.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 5 августа 2009 г.)

Описан стенд для изучения теплообмена импульсного спрея с нагретой ниже точки кипения поверхностью. Описаны калориметр для измерения интегрального теплообмена с точностью 1.5–3%, а также аппаратура, формирующая импульсный спрей. Приведены основные параметры формируемого газочапельного потока (скорость газа и жидкости, динамика изменения длительности гидроимпульса и размер составляющих его капель при движении к теплообменнику, распределение концентрации жидкости в сечении и по потоку) и методы их измерения. Показано влияние длительности цуга капель в потоке на тепломассоперенос.

Введение

Экспериментально показано, что вводимые в газочапельный поток искусственные возмущения интенсифицируют теплообмен между струей и нагреваемой поверхностью [1–3]. Большие перспективы по увеличению эффективности теплообмена открываются при использовании в системах охлаждения управляемых источников аэрозоли. Такие системы позволяют в зависимости от тепловой нагрузки теплообменника задавать параметры охлаждаемого газочапельного потока за счет изменения длительности, частоты и места подачи на поверхность теплообменника жидкостной составляющей потока, создавая оптимальный режим теплообмена.

Взаимодействие капель аэрозоля с нагреваемой поверхностью характеризуется большим количеством различных факторов, с трудом поддающихся учету и теоретическому анализу. Поэтому при исследовании теплообменных процессов при спрейнном охлаждении огромную роль играет эксперимент.

Калориметр и теплообменник

Экспериментальная установка состоит из оригинального цифрового калориметра с теплообменником [4,5] и импульсного программируемого источника спрея.

Теплообменник, выполненный из высокотеплопроводной меди, имеет размеры рабочей поверхности 140×140 мм и толщину 25 мм. Рабочая пластина нагревается водой. В опытах было реализовано граничное условие $T_w = \text{const}$ (температура поверхности теплообменника), справедливость которого подтвердили измерения температуры теплообменной поверхности в различных ее точках с помощью термпар. Теплообменник может быть установлен на разных расстояниях от истока газочапельного потока и под разными углами относительно направления распространения аэрозоли.

Регистрация интенсивности охлаждения импульсным спреем поверхности теплообменника выполнялась калориметром, измеряющим интегральный тепловой поток. Контур теплоносителя цифрового калориметра состоит из теплообменника, первичного преобразователя образцового ультразвукового расходомера, электродкотла, циркуляционного насоса, накопительного объема и теплоизолированных подводных шлангов. В поток контура введены специальные попарно калиброванные платиновые термометры сопротивления для измерения перепада температуры теплоносителя между входом и выходом в теплообменник, термометр жидкости в потоке спрея, термометр жидкости с поверхности пластины в специальном сборнике.

Как показала практика, суммарная погрешность измерения теплового потока, отводимого от теплообменника, с учетом паразитных тепловых потоков (теплопроводящая арматура и т.п.) находится в пределах 1.5–3% (около 20 J), что позволяет с приемлемой точностью определять параметры теплообмена и их зависимость от режима охлаждающего потока.

На рабочей поверхности теплообменника установлены локальные датчики теплового потока [6] и локальные емкостные зонды для наблюдения за толщиной, волнообразованием и динамикой течения пленки жидкости по поверхности [7,8].

Импульсный источник спрея

Управляемый источник газочапельной струи конструктивно выполнен в виде двухкамерного блока: для воздуха и воды. На плоской части источника расположены 16 жидкостных форсунок в виде матрицы 4×4 . На этой же поверхности для создания газочапельного воздушного потока установлены 25 газовых сопел с диаметром выходного отверстия 3.5 мм. Жидкостная форсунка представляет собой распылитель из четырех сопел диаметром $125 \mu\text{m}$, включаемых одним электромагнитным клапаном. Расход жидкости определяется

давлением на входе блока электромагнитных клапанов ($P_L = (0.5-3) \cdot 10^{-1}$ МПа, при этом скорость жидкости в потоке регулируется 0.5–30 м/с). Изменение длительности ($T_i = 0.002-0.01$ с) и частоты открытия клапана ($F_i = 1-50$ Гц) позволяет формировать газонакапельный поток с заданной массой жидкой фазы. Программное включение клапанов позволяет формировать поток спрея различной интенсивности во времени и по координате на поверхности теплообменника. Расход газовой составляющей не изменяется во времени для конкретного режима и определяется давлением на входе воздушного блока. За счет изменения рабочего давления $P_g = (0-6) \cdot 10^{-1}$ МПа скорость воздушного газонакапельного потока может быть установлена 0–20 м/с.

Параметры спрея

В серии экспериментов теплообменник и источник аэрозоли были установлены вертикально к горизонтальной оси на расстоянии 230 мм друг от друга. При таком расположении в сечении установки поверхности теплообменника источник импульсного газонакапельного потока формирует двухфазный поток площадью 300×300 мм.

Измерения однородности распределения фаз по сечению газонакапельного потока у поверхности теплообменника [5] показали, что отклонение концентрации жидкости от среднего не превышает 5% на площади, равной поверхности теплообменника, несмотря на разброс индивидуальных расходов клапанов (10%). Калиброванные воздушные сопла позволили получить распределение газовой фазы в свободном пространстве без теплообменника не хуже 5%.

Для наблюдения за поведением капель при движении к теплообменнику и определения их размера была проведена съемка спрея высокоскоростной цифровой видеокамерой [5]. Параллельно видеосъемке поведение цуга жидкости контролировалось регистрацией времени бомбардировки каплями потока конденсаторного электретоного датчика пульсаций. Датчик диаметром $D = 10$ мм имел чувствительность $S = 10$ мВ/Па в диапазоне 50–15 000 Гц. Датчик перемещался программируемым координатным устройством с шагом 20 мм (точность перемещения 20 мкм).

Анализ видеоданных показал, что при вылете струек жидкости из четырех отверстий инжектора они сразу разбиваются на отдельные капли длиной 200–500 мкм. При движении к теплообменнику дробление капель продолжается. У поверхности пластины наблюдаются два основных размера капель: крупные — 120–150 мкм и мелкие — 45–50 мкм. При этом капли с малой массой за счет сопротивления воздуха отстают от капель с большей массой, которые достигают нагреваемую поверхность в первую очередь. Анализ данных показывает, что в процессе движения цуга капель происходит его удлинение в три–четыре раза.

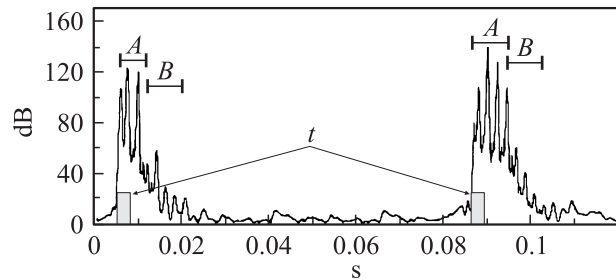


Рис. 1. Осциллограмма сигнала датчика пульсации давления капельного потока. Режим: $P_L = 0.2$ МПа; $P_g = 0.1$ МПа; $T_i = 3$ мс, $F_i = 10$ Гц; A — крупные капли (120–150) мкм; B — мелкие капли (45–50) мкм. t — время управления клапаном.

Это подтверждают данные, полученные от локального датчика пульсаций (рис. 1), установленного на расстоянии 0.21 м от источника. Интервал времени с большими значениями амплитуды („голова“ гидроимпульса) соответствует регистрации кинетической энергии, запасенной крупными каплями. „Хвост“ импульса соответствует мелким каплям. На рисунке импульс управления клапаном совмещен с передним фронтом сигнала датчика пульсаций для сравнения.

Осциллограмма подтверждает визуальные наблюдения, что на расстоянии 0.21 м продолжительность гидроимпульса увеличивалась в 4 раза по сравнению с длительностью импульса управления (с 0.003 до 0.012 с). Этот эффект следует учитывать при формировании режима орошения нагреваемой поверхности.

Изменение величины относительной кинетической энергии группы капель вдоль оси спрея в импульсном и непрерывном режимах показано на рис. 2. Анализ опытных данных свидетельствует о влиянии режима

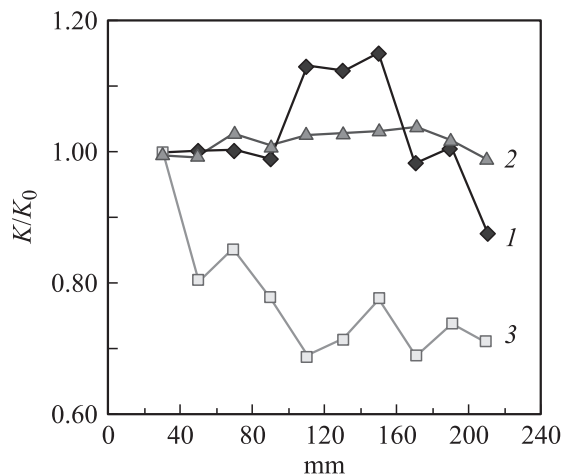


Рис. 2. Распределение относительной кинетической энергии потока капель на оси спрея. (K_0 — энергия капель на выходе из сопла). Режим: $P_L = 0.2$ МПа, $P_g = 0.1$ МПа. 1 — импульсный спрей с направленным потоком $T_i = 3$ мс, $f = 1$ Гц, 2 — непрерывный спрей без направленного потока, 3 — непрерывный спрей с направленным потоком.

на отношение K/K_0 , при общей тенденции к снижению этого параметра по мере движения спрея как в непрерывном, так и импульсном режимах формирования. Локальные неоднородности могут быть вызваны перераспределением концентрации капельной фазы, процессами дробления капель и их коалесценцией. В то же время для импульсного спрея наблюдается ярко выраженный максимум на некотором расстоянии от сопла, что говорит о наибольшей группировке капель в этой зоне. Возможно, что при иной начальной скорости потока и частотных параметрах спрея область с высокой концентрацией аэрозоля изменяется как по координате, так и амплитуде.

Частотный спектр пульсаций энергии импульсного спрея, представленный на рис. 3, позволяет выявить вклад различных механизмов, оказывающих влияние на его внутреннюю структуру в процессе распространения. Анализ спектра пульсаций энергии в диапазоне $f = 2-3200$ Hz показал, что основной вклад приходится на область частот $f = 0.5-1$ kHz. Спектр пульсаций энергии цуга капель в низкочастотной области ($f_1 = 10-150$ Hz) связан с частотой повторения импульсов и их длительностью, высокочастотная область спектра формируется воздействием отдельных капель и коротких группировок ($f_2 = 0.5-1$ kHz). На рис. 3 приведена эта область для двух положений датчика (0.03 и 0.21 m) от источника. Как следует из рис. 3, при движении импульса спрея вдоль оси в низкочастотной (f_1 интервалы A и B) и высокочастотной (f_2 интервалы C и D) зонах максимумы смещаются в более высокочастотную область спектра пульсаций, что указывает на эффект группировки капель.

Очевидно, что подобное перераспределение капель в чередующихся импульсах спрея кардинально изменяет характер формирования жидкой пленки и соответственно оказывает различное влияние на поверхностный теплообмен.

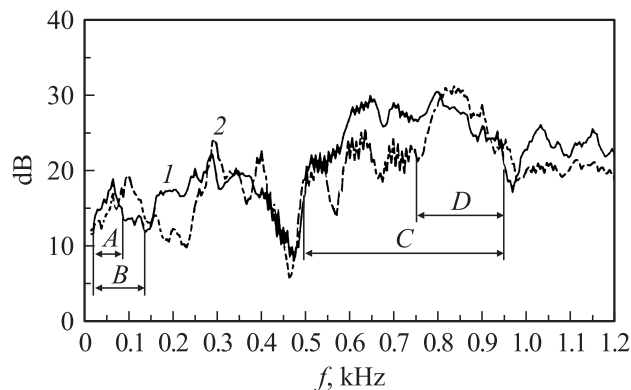


Рис. 3. Частотный спектр пульсаций энергии импульсного спрея для двух позиций датчика. Режим: $T_i = 0.003$ s, $F_i = 10$ Hz, $P_L = 0.2$ MPa, $P_g = 0.1$ MPa. 1 — 30, 2 — 210 mm от сопла.

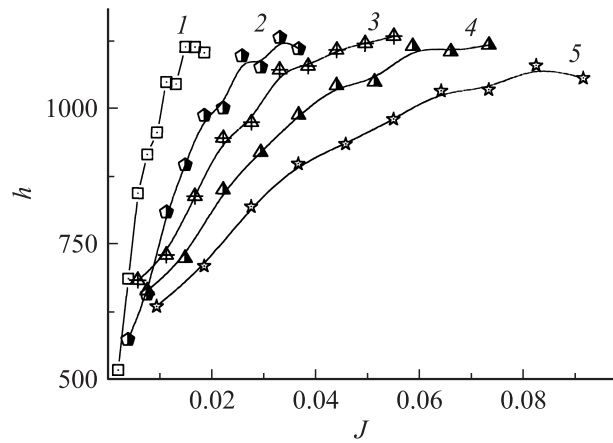


Рис. 4. Влияние длительности импульса на коэффициент теплоотдачи — h [(W/m²) · K] от удельной плотности потока капель — J [(kg/m²) · S]. 1 — 2, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 8 и 5 — 10 ms. Режим: $T_i = 0.002-0.01$ s, $F_i = 1-10$ Hz; средняя скорость воздуха — 8 m/s. Соотношение среднemasовых скоростей жидкой и газовой фаз — 0–0.01.

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов теплоотдачи от расхода жидкой фазы охладителя. В зависимости от длительности импульса опытные данные заметно расходятся, причем максимум коэффициента теплоотдачи для менее длительных импульсов достигается при значительно меньших объемах орошения. Следовательно, использование коротких импульсов подачи жидкости является более эффективным с точки зрения интенсификации теплоотдачи. При этом величина самого максимума практически слабо зависит от скорости орошения.

Особую роль играет газокпельный поток, который без жидкой фракции имеет незначительный вклад в теплообмен (3–5)%. Но, как показали оптические наблюдения, при газокпельном течении поток газа принимает „мелкую“ фракцию вторичных капель к поверхности теплообменника и тем самым включает их в теплообмен, что значительно увеличивает коэффициент теплоотдачи.

Заключение

Созданный экспериментальный стенд позволяет проводить комплексные исследования в области быстро протекающих процессов теплообмена при охлаждении импульсным спреем. Конструкцией стенда предусмотрена установка охлаждаемой поверхности под разными углами относительно источника импульсного спрея и горизонта. Источник спрея имеет программируемое управление параметрами импульсного газокпельного потока в широких пределах.

Исследования поведения импульсного потока спрея показали, что в пространстве дрейфа происходит удлинение в четыре раза цуга капель и этот процесс зависит от начальной скорости капель, дистанции дрейфа и скорости потока воздуха. В „голове“ цуга происходит концентрация крупных капель; мелкие капли сосредотачиваются в „хвосте“.

При движении от источника к теплообменнику внутри капельной массы возникают локальные неоднородности, которые могут быть вызваны перераспределением концентрации капельной фазы, процессами дробления капель и их коалесценцией.

Использование коротких импульсов подачи жидкости в охлаждающем газокапельном потоке является более эффективным с точки зрения интенсификации теплоотдачи.

Газокапельный непрерывный поток газа вносит существенный вклад в поведение вторичных капель, возвращая их на поверхность теплообменника, что увеличивает эффективность использования охлаждающей жидкости.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-08-00197.

Список литературы

- [1] *Tianshu L. and Sullivan J.P.* // Int. J. Heat Mass Transf. 1996. Vol. 39. N 17. P. 3695–3706.
- [2] *Alekseenko S., Bilsky A., Heinz O., Iyushin B., and Markovich D.* // Proc. 4th Int. Sympos. on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Antalya, Turkey, 2003. P. 235–241.
- [3] *Pavlova A.A., Otani K., and Amitay M.* // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29. P. 131–148.
- [4] *Nazarov A.D., Serov A.F., Terekhov V.I., and Sharov K.A.* // 3rd Int. Topical Team Workshop on TwO-phase systems for ground and space applications. Brussels, Belgium, 2008. P. 89.
- [5] *Nazarov A.D., Terekhov V.I., Serov A.F., Sharov K.A.* // 7th Int. Symp. on Heat Transfer (ISHT 08) October 26–29, 2008. Beijing, China.
- [6] *Мутяков В.Ю.* Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте. Дис. докт. техн. наук. СПб.: СПбГПУ, 2005. 239 с.
- [7] *Серов А.Ф., Назаров А.Д., Терехов В.И., Шаров К.А.* // Тр. 4-й Рос. национальной конф. по теплообмену. М., 2006. С. 205–208.
- [8] *Терехов В.И., Серов А.Ф., Назаров А.Д., Шаров К.А.* // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 1–8.