

03

Подавление теплообмена при взаимодействии импактной струи с полусферической каверной

© В.И. Терехов, С.В. Калинина

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 25 мая 2011 г.

Описаны результаты экспериментального исследования теплообмена при импактном натекании струи на преграду в форме полусферической каверны. Установлено значительное (в 2–3 раза) снижение локального теплообмена по сравнению с плоской поверхностью. Обсуждается механизм подавления турбулентной конвекции, а также возможные методы управления интенсивностью теплообмена.

В последние годы возрос интерес к изучению структуры течения и теплообмена поверхностей при наличии углублений сферической формы (лунки). Это объясняется прежде всего тем, что лунки показали себя как эффективный интенсификатор теплообмена при их продольном обтекании [1–3]. Течение и теплообмен в каверне существенно изменяются при импактном натекании потока на преграду, а имеющиеся немногочисленные работы [4–6] не в полной мере раскрывают механизм процессов турбулентного переноса в силу их сложности и многофакторности. Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению теплообмена при взаимодействии круглой струи с полусферической каверной, сопряженной с плоским диском. Варьируемыми параметрами в опытах были число Рейнольдса, диаметр сопла, расстояние между соплом и преградой. Важной особенностью работы по сравнению с аналогичными исследованиями других авторов [4,5] является то, что измерение теплообмена проводилось не только внутри каверны, но и за ее пределами. Это делает полученную информацию более полной и применимой для более широкого диапазона условий, в том числе для системы струй.

Условия экспериментов были следующие (рис. 1). Воздушная струя формируется соплом (1) диаметром $d_0 = 4.5, 8.9$ или 17.8 mm. Рас-

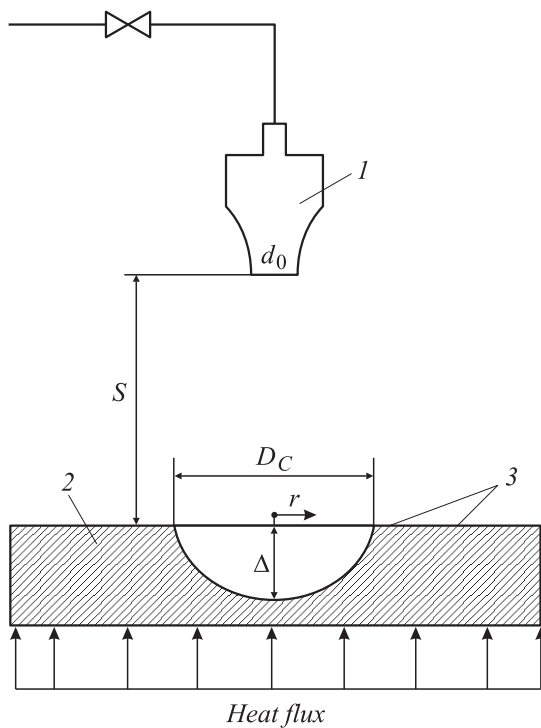


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — сопло; 2 — преграда; 3 — датчики теплового потока.

пределение скорости в выходном сечении сопел равномерное, интенсивность турбулентности составляет 0.3–3.5%. Числа Рейнольдса, рассчитываемые по параметрам на срезе сопла, изменяются в диапазоне $Re = U_0 d_0 / \nu_0 = 1.2 \cdot 10^4 - 5.8 \cdot 10^4$, где U_0 — скорость потока в осевой части сопла, ν_0 — кинематическая вязкость. Расстояние от сопла до преграды S варьируется от 0 до $10d_0$. Параметры сферического углубления сохраняются постоянными и составляют диаметр $D_c = 46$ mm, глубина $\Delta = 0$ (плоская стенка) и 23 mm. Контролируемая в течение экспериментов температура воздушной струи близка к комнатной. Изготовленная из меди преграда (2) нагревается с помощью электрического нагревателя. Высокая теплопроводность материала преграды позволя-

ла обеспечивать режим $T_w = \text{const}$ (T_w — температура поверхности преграды). Идущие через стенку тепловые потоки и их пульсации измеряются миниатюрными ($2 \times 2 \text{ mm}$) датчиками градиентного типа (3). Теплопроводность воздуха λ_0 , необходимая для расчета чисел Нуссельта ($Nu = \alpha d_0 / \lambda_0$, α — коэффициент теплоотдачи), определялась по температуре потока на выходе из сопла. Более подробно комплекс исследований обтекания и теплообмена для сопла $d_0 = 8.9 \text{ mm}$ представлен в работах [7,8].

Результаты измерений распределения локальных коэффициентов теплоотдачи, типичные для исследованного диапазона числа Re , представлены на рис. 2. На рис. 2, *a* анализируется влияние расстояния между соплом и преградой S на закономерности теплообмена, а на рис. 2, *b* — диаметра сопла d_0 . Видно (рис. 2, *a*), что непосредственно в полости лунки величины локальных коэффициентов теплоотдачи во всех рассмотренных условиях существенно (более чем в 2 раза) ниже, чем при таких же условиях на плоской преграде и расслаиваются в зависимости от расстояния между соплом и преградой. Как показано в работе [8], пониженная интенсивность теплообмена в лунке может быть объяснена большим сопротивлением потоку струи, вызванным формированием над и внутри углубления торообразного вихря, характеристики которого зависят от геометрических параметров течения.

Увеличение диаметра сопла при фиксированных Re и S/d_0 приводит к заметному снижению интенсивности теплоотдачи внутри сферической каверны. Это следует из рис. 2, *b*, где сравниваются результаты измерений для трех диаметров сопла. Возможным объяснением такого поведения теплоотдачи может служить квадратичное снижение скорости в устье сопла с ростом d_0 и более сильное размытие струи из-за увеличения реального расстояния между соплом и преградой.

Одной из характерных областей при импактом натекании струи является область лобовой точки. Результаты для лобовой точки плоской преграды и лунки, обработанные в виде зависимости $Nu_0 = f(Re)$ для фиксированного отношения $S/d_0 = 6$, показаны на рис. 3. Там же приведены результаты аналогичных измерений Lee et al. [4].

Известно [9], что при низком уровне турбулентности на срезе сопла и равномерном начальном профиле скорости, что соответствовало условиям наших экспериментов, теплоотдача в лобовой точке плоской преграды описывается критериальными формулами типа $Nu_0 = (Re, Pr, S/d_0)$. Как следует из рис. 3, опытные данные для

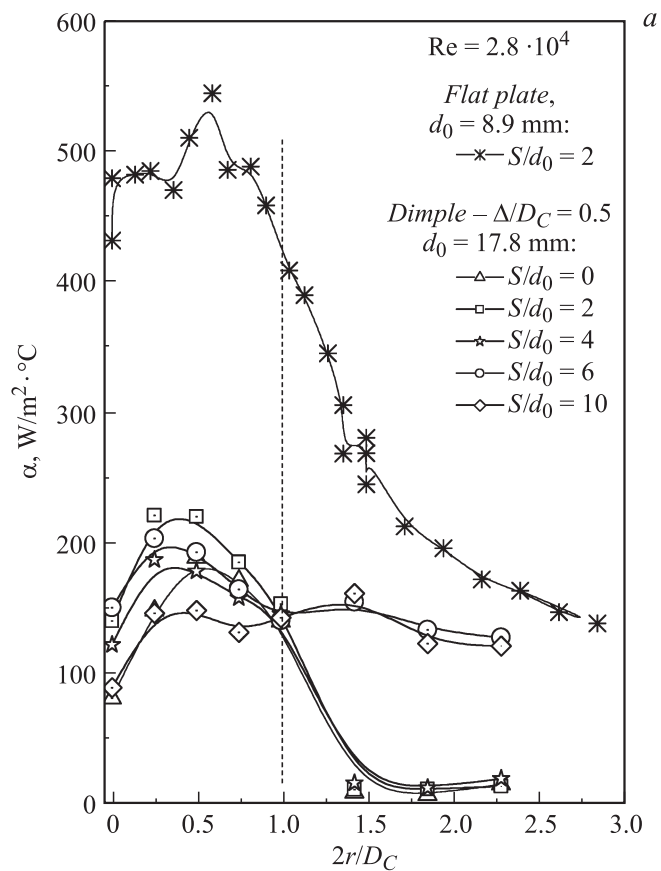


Рис. 2. Радиальные распределения коэффициента теплоотдачи: *a* — при вариации расстояния между соплом и преградой; *b* — при вариации диаметра сопла.

лобовой точки плоской преграды, полученные для сопел разного диаметра, обобщаются между собой и совпадают с результатами других авторов. Таким образом, заметного влияния диаметра сопла на корреляционное соотношение $Nu_0 = (Re)$ при теплообмене струи с плоской преградой не обнаружено.

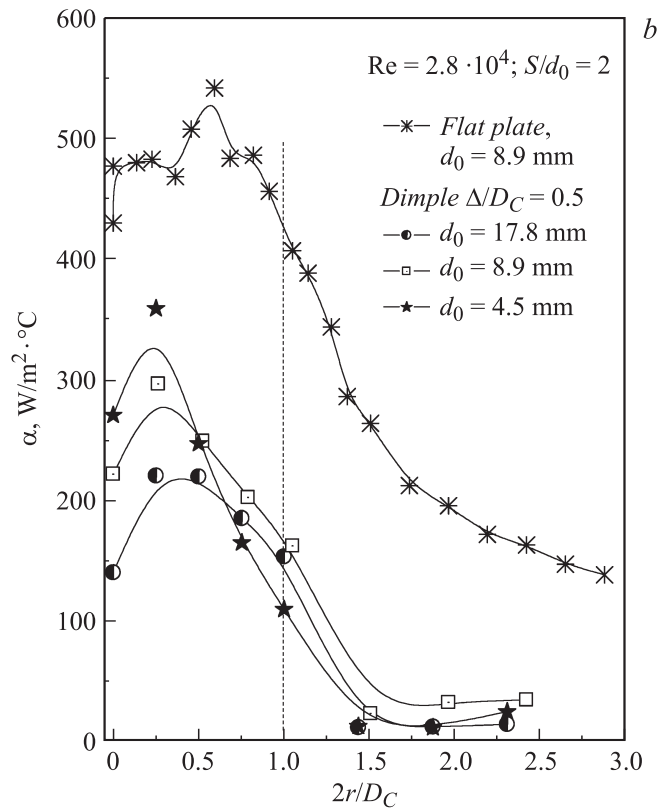


Рис. 2 (продолжение).

Результаты для лобовой точки полусферической каверны отличаются и от результатов наших исследований на плоской стенке, и от результатов работы [4] для полусферы. Согласно данным [4], с переходом от плоской стенки к лунке значение Nu_0 в лобовой точке уменьшается, но это уменьшение не велико, не превышает 10% и слабо зависит от d_0 . По нашим данным также наблюдается уменьшение Nu_0 с переходом от плоской стенки к лунке, при этом оно может быть весьма значительным, до нескольких раз, и сильно зависит (расслаивается) от диаметра сопла. Как уже отмечалось, расслоение опытных зависимостей $Nu_0(Re)$ при изменении диаметра сопла объясняется особенностями формирующе-

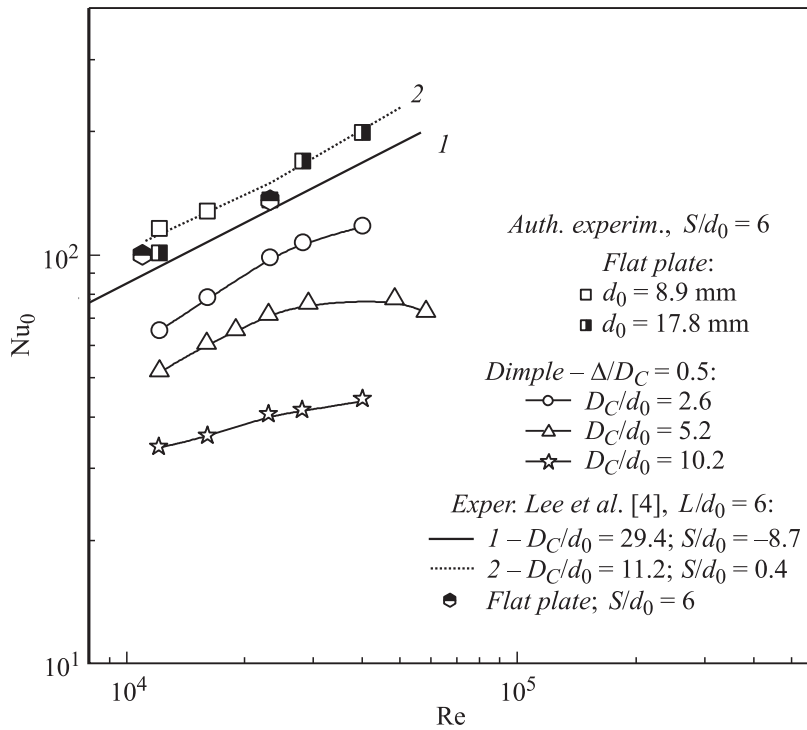


Рис. 3. Теплоотдача в лобовой точке.

гося над лункой вихревого движения потока. В работе [4] отношение диаметра каверны к диаметру сопла было больше, чем в данной работе ($D_C/d_0 \sim 11-29$), а профиль скорости на срезе сопла был развитым.

Кроме низких значений коэффициента теплоотдачи в полости лунки, представляющего практический интерес, в экспериментах выявлено сильное влияние геометрических параметров струи на теплоотдачу в области за лункой, причем оно имело место при всех числах Рейнольдса. Как следует из рис. 2, при одних значениях d_0 и S/d_0 теплоотдача за лункой практически отсутствовала, при других — была достаточно большой, близкой к аналогичному значению на плоской преграде. Интерес представляет и то, что это изменение происходило достаточно резко, в диапазоне S/d_0 от 4 до 6. Как показали расчеты, переход от одного режима теплообмена к другому происходит, когда

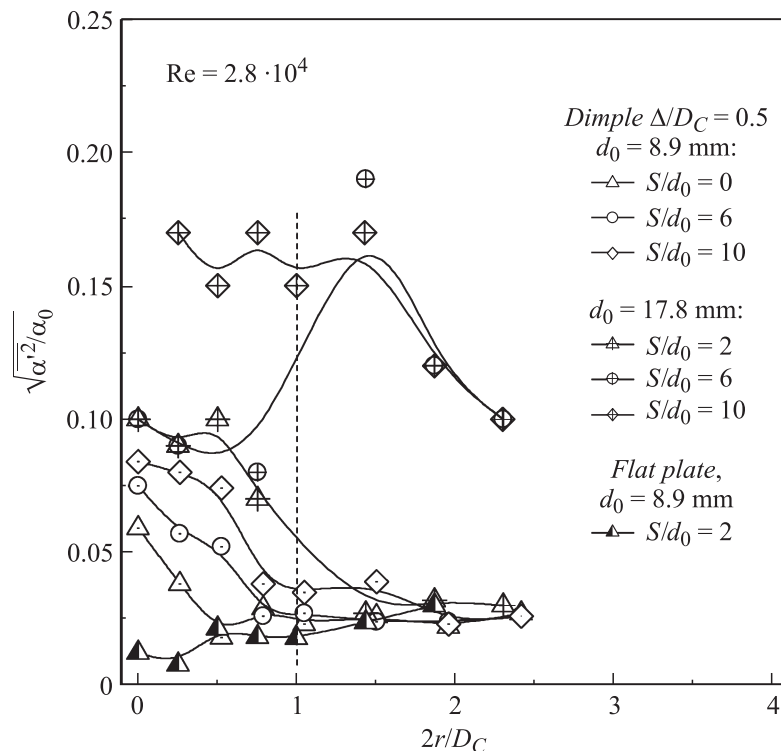


Рис. 4. Радиальные распределения пульсаций коэффициента теплоотдачи.

диаметр расширяющейся с ростом S/d_0 струи становится равным или превышает диаметр углубления, а турбулентные пульсации слоя смешения проникают до стенки.

Основные особенности турбулентного поля течения и теплопереноса характеризуют данные, представленные на рис. 4. Здесь показаны радиальные распределения пульсаций теплового потока на стенке, полученные для различных условий. Опытные значения локальных среднеквадратичных пульсаций коэффициента теплоотдачи $\sqrt{\alpha'^2}$ отнесены к осредненной по времени величине коэффициента теплоотдачи в лобовой точке α_0 . Из рис. 4 следует, что для плоской преграды минимум флуктуаций потока тепла наблюдается в окрестности лобовой точки.

Далее, по мере продвижения от оси при формировании и развитии пристенной струи пульсации возрастают. Это находится в полном качественном и количественном согласии с результатами измерений работы [10].

Пульсации теплового потока в лунке по сравнению с плоской стенкой существенно возрастают и зависят от рассматриваемого радиального положения и геометрических параметров установки. Сильный рост пульсаций наблюдался в области за лункой для сопла $d_0 = 17.8$ mm при увеличении расстояния от $S/d_0 = 4$ к $S/d_0 = 6$. Полученный результат соответствует наблюдаемому при этих условиях росту местной теплоотдачи.

В итоге проведенных исследований можно сделать вывод, что в системах, использующих струйное охлаждение поверхностей, за счет вариации геометрических параметров можно существенно повлиять на характеристики теплообмена.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-08-00105-а).

Список литературы

- [1] Afanasyev V.N., Chudnovsky Ya.P., Leontiev A.I., Roganov P.S. // Exp. Thermal and Fluid Sci. 1993. V. 7(1). P. 1–8.
- [2] Коваленко Г.В., Терехов В.И., Халатов А.А. // ПМТФ. 2010. № 6. С. 78–88.
- [3] Mahmood G.I., Ligrani P.M. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2002. V. 45. P. 2011–2020.
- [4] Lee D.H., Chung Y.S., Won S.Y. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1999. V. 42. P. 2489–2497.
- [5] Нрысак Р. // Proc. 7th Int. Heat Trans. Conf. Munchen Hemisphere Publ. Corp. Wash., N. Y., London. 1982. V. 3. P. 357–362.
- [6] Kanokjaruvijit K., Martinez-Botas R.F. // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2005. V. 48(1). P. 161–170.
- [7] Терехов В.И., Барсанов В.Л., Калинина С.В., Мшвидобадзе Ю.М. // ИФЖ. 2006. Т. 79(4). С. 29–37.
- [8] Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M., Sharov K.A. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52(11–12). P. 2498–2506.
- [9] Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: „Наук. думка“, 1982. 304 с.
- [10] Donovan T.S., Murray D.B. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 3291–3301.