

УДК 536.24

Экспериментальное изучение влияния вихревой пелены от малого препятствия на отрывное течение в каверне*

А.Ю. Дьяченко, В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина

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

E-mail: yarygina@itp.nsc.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния на отрывное турбулентное течение и теплообмен в плоской поперечной полости расположенного перед отрывом вихреобразующего элемента в виде малого поперечного ребра с высотой на порядок меньшей, чем глубина каверны. В опытах изменялся угол наклона передней и задней стенок каверны. Варьировалась высота малого ребра и его расстояние до каверны. Показано, что внесение дополнительных вихревых возмущений в рециркуляционную зону приводит к заметным изменениям вихреобразования, распределений коэффициентов давления и теплоотдачи. Оптимальные значения высоты минитурбулизатора и его местоположения определяются попаданием точки присоединения от миниребра на заднюю стенку каверны. При этом максимальное значение коэффициента теплоотдачи возрастает по сравнению со случаем отсутствия вихревого генератора до 30 %.

Ключевые слова: поперечная каверна, отрывной турбулентный поток, термографическая визуализация, теплоотдача, коэффициенты давления, неустойчивость.

Введение

Контроль над характеристиками тепломассопереноса в отрывных течениях является важным направлением в решении проблемы повышения эффективности и надежности теплоэнергетического оборудования [1–4]. Данное направление слабо представлено в научных публикациях по сравнению с широко распространенными методами управления динамикой отрывных потоков [5]. Наиболее приемлемыми с практической точки зрения являются пассивные методы управления теплообменом в отрывных областях за такими преградами, как уступы или каверны, основанные на использовании перед зоной отрыва внешней турбулентности [6–8] или дополнительных турбулизирующих элементов, существенно меньших размеров, чем высота рассматриваемой преграды [9–12].

В работах [7–8] установлено, что внешняя турбулентность уменьшает масштаб вихревых структур, длину отрывной области и влияние торцевых стенок на рециркуляционную область, но при этом интенсифицирует теплоотдачу в зоне отрыва. Так, например, в системе нескольких ребер во второй ячейке наблюдается крайне неустойчивое вихреобразование, что связано с наличием встречного течения к основному потоку из третьей ячейки

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00249) и Минобрнауки РФ (государственный контракт № 14.518.11.7015).

во вторую. Под влиянием внешней турбулентности течение во второй ячейке стабилизируется. Из-за различной предыстории потока воздействие высокой внешней турбулентности на характеристики отрывного течения за различными преградами проявляется по-разному. Тенденция снижения размеров отрывного пузыря за преградами при высокой турбулентности связана с заметным ростом слоя смешения. Увеличение слоя смешения за ребром происходит более интенсивно, чем за уступом, и в первом случае отрывная область сокращается на 30 %, а во втором — только на 20 %. Соответственно интенсификация теплоотдачи за ребром более выражена, чем за уступом. При этом более низкие преграды сохраняют очевидное преимущество в качестве интенсификаторов теплоотдачи. Наиболее сильное увеличение теплоотдачи внешней турбулентностью проявилось в поперечной каверне и системе ребер.

Однако использование перед преградами минитурбулизаторов является более простым способом управления и динамическими, и тепловыми характеристиками отрывного течения. Контроль над тепловыми характеристиками отрывного потока в этом случае осуществляется введением в отрывную область дополнительного вихревого слоя, приводящего к кардинальным изменениям структуры рециркуляционной зоны, смещению точки присоединения потока и соответственно к перераспределению коэффициентов давления и тепломассоотдачи. Интерес к использованию вихревых генераторов непрерывно возрастает. В работах [9–10] проведены численные исследования методами DNS и LES пассивно контролируемого турбулентного отрывного течения за обращенным назад уступом. Были рассчитаны профили скорости и пульсации скорости, а также спектральная плотность в плоском канале при наличии перед ступенькой ребра малой высоты при заданном расстоянии от ступеньки. Авторами продемонстрированы значительное увеличение толщины слоя смешения, сокращение зоны рециркуляции и неустойчивость течения в целом. Экспериментальным путем в работе [11] для заданных размеров канала были предложены оптимальные размеры вихрегенератора, представляющего тонкое неподвижное и осциллирующее ребро. По этим рекомендациям высота интенсификатора должна равняться $1/3$ высоты ступеньки H и находиться на расстоянии $4H$ вверх по потоку. В работе [12] проводились опыты по изучению влияния на процесс присоединения за уступом дополнительной турбулентности, генерируемой малым турбулизатором в виде стержня или поперечной каверны. Показано, что в точке отрыва потока в профилях интенсивности турбулентности появляются характерные небольшие пики, указывающие на присутствие турбулизатора. Для стержня отмечено уменьшение длины области присоединения, а для канавки — ее рост. С точки зрения интенсификации теплообмена интерес представляет поиск оптимальных размеров вихреобразователей и их местоположения до преграды. В силу сложности и многофакторности воздействия вихревой пелены на теплообмен в отрывном потоке задача остается мало изученной. Ощущается острый недостаток экспериментальных данных. И поскольку все проводимые исследования связаны с обратным уступом, целесообразно рассмотреть действие вихревой пелены от мини генератора на отрывное течение за преградой другой формы, например, в каверне. Для поперечных траншей интересной областью, влияющей на теплообмен, является также задняя кромка, так как максимальная интенсификация теплоотдачи реализуется на задней стенке каверны.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований вихреобразования, полей давления и температуры в поперечной полости при изменении угла наклона передней и задней стенок каверны при наличии перед отрывной областью малого интенсификатора в виде поперечного ребра. Варьировались высота ребра и его местоположение. Целью исследования было получение информации по коэффициентам давления и теплоотдачи при интерференции двух отрывных течений с разными масштабами.

Экспериментальное оборудование

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН [5]. Сечение рабочего канала аэродинамической трубы составляет 200×200 мм, длина 1000 мм. На нижней стенке канала помещалась модель с траншеей между двумя обтекателями. Перед каверной длина обтекателя равнялась 480 мм, длина плоской поверхности за каверной составляла 200 мм. Изучалось обтекание каверны, имеющей следующие размеры (рис. 1): глубина $H = 60$ мм, ширина дна полости (от точки В до точки С) $L = 60$ мм, длина в трансверсальном направлении $W = 180$ мм, так что $W/H = 3$ и $H/L = 1$. Стенки полости плотно прилегали к стенкам канала. Всего было изготовлено три модели — для термографической визуализации, для измерения полей давления и тепловых характеристик. Так, при измерении теплоотдачи с помощью термопар стенки траншеи были изготовлены из листа текстолита толщиной 20 мм. Эксперименты выполнены при углах наклона боковых стенок $\varphi = 30, 45, 60, 70, 80, 90^\circ$. При изменении угла наклона боковых стенок высота каверны H и ширина дна полости по направлению потока L оставались постоянными, а расстояние от точки А до точки D увеличивалось с уменьшением угла φ . При этом в зависимости от угла наклона изменялась длина боковых стенок L_w .

Измерения проведены в диапазоне скоростей набегающего потока $U_0 = 5 \div 35$ м/с, которым соответствовали значения числа Рейнольдса $Re_H = HU_0/\nu = 2 \cdot 10^4 \div 1,4 \cdot 10^5$. Основной объем экспериментов с микротурбулизаторами выполнялся при скорости набегающего потока 20 м/с ($Re_H = 8 \cdot 10^4$). При всех скоростях пограничный слой перед каверной был турбулентным. Толщина потери импульса пограничного слоя перед отрывом потока $\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho U}{\rho_0 U_0} \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) dy$ рассчитывалась по экспериментальным профилям

скорости и изменялась в зависимости от числа Рейнольдса в диапазоне 3,2–3,7 мм, что соответствовало значению толщины пограничного слоя $\delta \approx 35$ мм. Степень турбулентности набегающего потока в канале, измеренная с помощью термоанемометра DISA-55M, составляла 1,2 %. При исследовании распределения статического давления в каверне модель была снабжена восьмьюдесятью приемниками статического давления, расположенными на передней и задней боковых стенках и дне каверны в шести сечениях — по два на каждой стенке.

С помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 36 мкм с шириной дорожек 5 мм в режиме постоянного теплового потока осуществлялся нагрев боковых стенок и дна. Поверхность траншеи была препарирована 158-ю хромель-копелевыми термопарами в трех продольных сечениях на дне, в пяти продольных сечениях на боковых стенках и в четырех сечениях поперек потока (по одному на боковых стенках и в двух сечениях на дне каверны). Для оценки утечек тепла через пластину с обратной стороны каждой нагреваемой стенки было заделано по четыре термопары.

В термографических экспериментах каверна с нагревателем помещалась на боковую стенку заподлицо со стенкой канала. Противоположная стенка была выполнена из оптического стекла или в некоторых случаях заменялась полиэтиленовой пленкой. Каверна прогревалась в течение одного часа при необходимом скоростном режиме, после чего температура

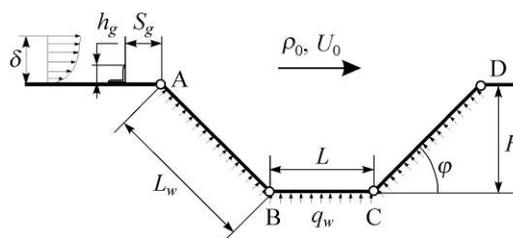


Рис. 1. Схема обтекания поперечной каверны с вихрегенератором в виде поперечного ребра, установленного перед полостью.

стенки измерялась тепловизором THERMO TRACER TH7102 IR Imager (Япония) со спектральным диапазоном 8–14 мкм. Оцифровка полученного поля температур производилась минимум по двум термопарам, и построение термограмм выполнялось с использованием специальных компьютерных программ.

В качестве вихревого генератора использовалось тонкое поперечное ребро высотой h_g от 2,5 до 10 мм, которое помещалось перед поперечной каверной на расстоянии от 0 до 100 мм от передней кромки А (рис. 1).

Результаты экспериментов

Термографическая визуализация течения

Была проведена термографическая визуализация в каверне при разных высотах малого ребра перед каверной и различных его расстояниях до передней кромки. Высота h_g равнялась 2,5; 5 и 7,5 мм, расстояние S_g составляло от 0 до 100 мм. Термограммы хорошо отслеживают динамическую сажемасляную картину обтекания дна полости [8]. Визуализация показала, что наиболее сильная перестройка течения и тепловой картины при увеличении высоты интенсификатора на передней кромке прямоугольной каверны имеет место в зоне вторичного течения непосредственно за расширением канала (рис. 2, течение слева направо). За передней стенкой кроме угловых вихрей, перемещающихся на торцевые стенки, появляется крупный вихрь в центре области. Это приводит к неустойчивости течения и переходу от структуры основного вихря, состоящей из одной ячейки, к структуре из двух ячеек. Такая неустойчивость при отсутствии вихревого генератора появляется в кавернах с углом наклона боковых стенок $\varphi < 70^\circ$ [8]. Для $h_g = 7,5$ мм центры двух ячеек становятся наиболее горячими, в отличие от других случаев, что свидетельствует об уменьшении теплоотдачи в каверне. Это связано с тем, что точка присоединения за миниребром $x_r \sim 15$ ($h_g = 112,5$ мм) устойчиво попадает за каверну.

При удалении минипреграды от кромки каверны вверх по потоку (рис. 3) течение в каверне становится все более мелкомасштабным. Подобное явление имеет место и при уменьшении угла φ . Для $\varphi \leq 70^\circ$ во вторичной зоне наблюдаются три вихря — два угловых и один в центре, причем более выраженные, чем при $\varphi = 90^\circ$. Понижение температуры вторичного вихря косвенно указывает на повышение теплоотдачи.

Коэффициенты давления

В прямоугольной поперечной каверне в центральном сечении по потоку и в трех контрольных сечения поперек потока были измерены распределения давления при наличии вихревого интенсификатора. Также измерены давления на расстоянии 50 мм до каверны и 70 мм за каверной. На рис. 4 представлены распределения коэффициентов давления по потоку в зависимости от высоты генератора, установленного на передней кромке каверны. Распределения давления в поперечных сечениях были практически идентичны. Как видно из графика (рис. 4), чем выше преграда, тем сильнее уменьшается коэффициент давления в каверне и возрастает в непосредственной близости перед каверной и за ней. Однако темп изменения замедляется, и при $h_g = 7,5$ и 10 мм распределения коэффициентов давления близки между собой.

Однако распределения давления (рис. 5) ведут себя неоднозначно в зависимости от расстояния ребра до полости. При изменении S_g от 0 до 10 мм разрежение в каверне усиливается. Наибольшее снижение коэффициента давления отмечается при $S_g = 10$ мм, то есть при $S_g = 2 h_g$. При дальнейшем увеличении S_g коэффициент давления в траншее опять начинает расти до уровня, характерного для случая отсутствия минипреграды.

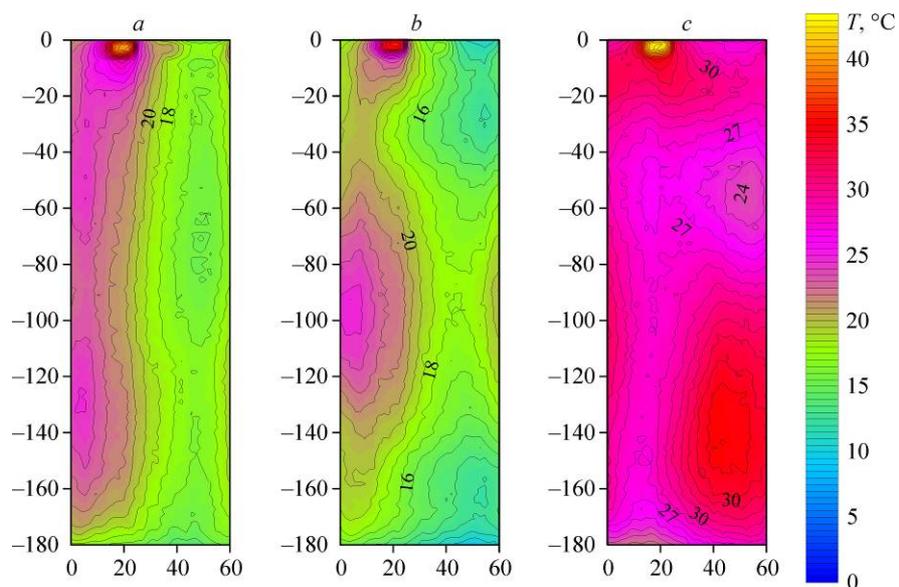


Рис. 2. Термограмма дна прямоугольной каверны с микротурбулизатором переменной высоты на передней кромке.

$h_g = 0$ (a), 2,5 (b), 7,5 (c); $S_g = 0$ (a–c).

Таким образом, коэффициент давления в каверне остается довольно низким, пока точка присоединения за миниребром попадает в каверну.

Коэффициенты теплоотдачи

На рис. 6 приведены для трех углов φ относительные средние по всей поверхности полости коэффициенты теплоотдачи, нормированные на среднее значение числа Нуссельта

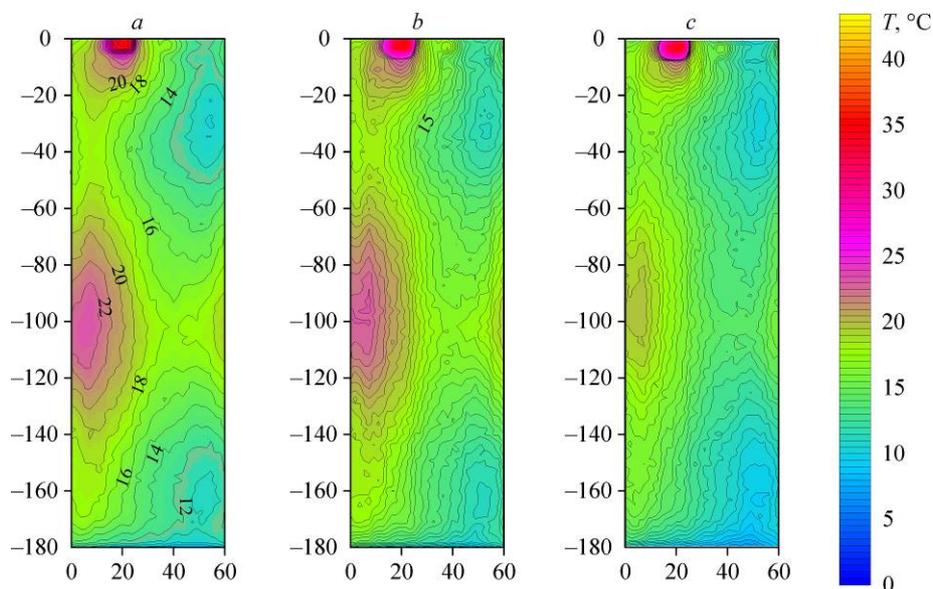


Рис. 3. Термограмма дна прямоугольной каверны за ребром высотой 5 мм на различных его расстояниях до каверны.

$h_g = 5$ мм; $S_g = 0$ (a), 5 (b), 10 (c) мм.

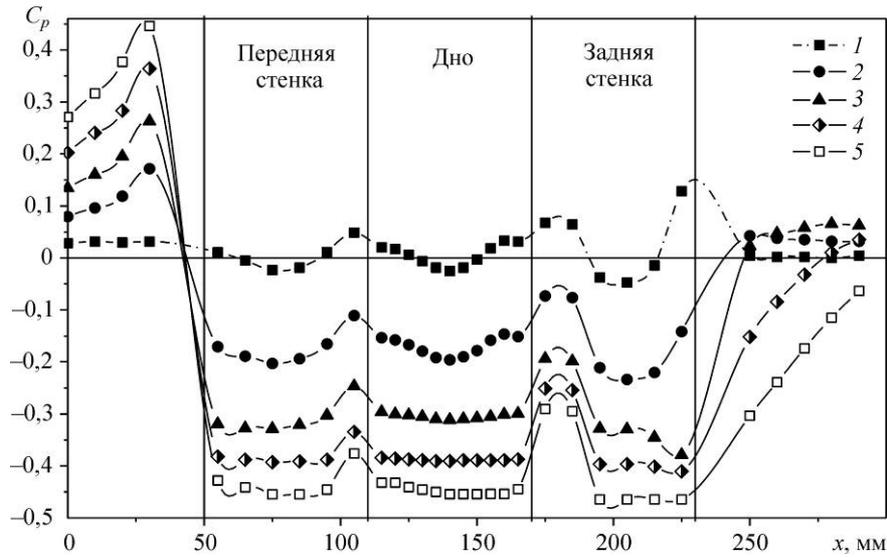


Рис. 4. Распределение коэффициента давления вдоль прямоугольной поперечной каверны при наличии микротурбулизатора на передней кромке.

$U = 30$ м/с; $h_g = 0$ (1), 2,5 (2), 5 (3), 7,5 (4), 10 (5).

в прямоугольной полости без микротурбулизатора. Рисунок 6, *a* демонстрирует зависимость относительного среднего числа Нуссельта от высоты миниребра, установленного на передней кромке каверны, а рис. 6, *b* — от местоположения ребра (высотой 5 мм) до каверны. Наиболее заметная интенсификация теплоотдачи наблюдается для каверн с наклонными стенками, практически не зависящая от высоты ребра, так как точка присоединения за ним для всех исследованных высот попадает в каверну. Для прямоугольной каверны эффект интенсификации теплоотдачи слабее, а при $h_g = 7,5$ мм, когда

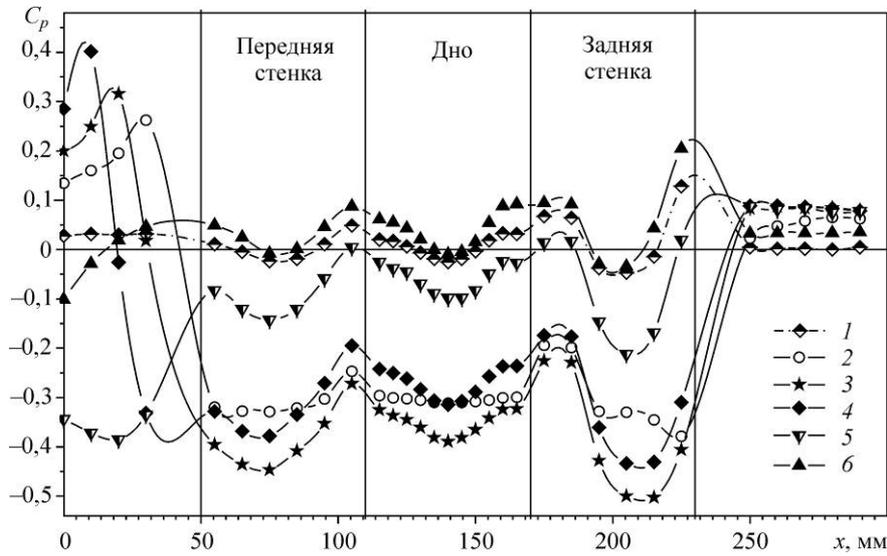


Рис. 5. Распределение коэффициента давления в прямоугольной поперечной каверне при наличии микротурбулизатора высотой 5 мм на разных расстояниях от каверны.

$h_g = 0$ мм (1); $h_g = 5$ мм: $S_g = 0$ (2), 10 (3), 25 (4), 50 (5), 100 (6) мм.

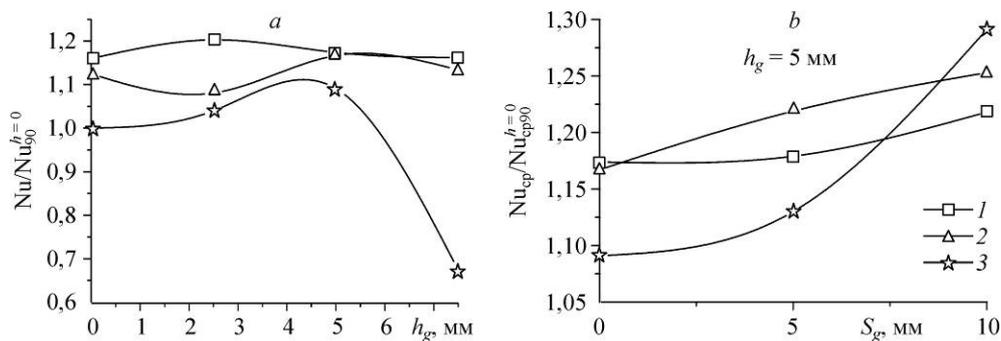


Рис. 6. Относительное число Нуссельта в каверне с разными углами φ при наличии на кромке микротурбулизатора в зависимости от его высоты (а) и в зависимости от его местоположения до каверны (б).

Угол $\varphi < 45^\circ$ (1), 70° (2), 90° (3).

точка присоединения за ребром попадает за каверну, — совсем не наблюдается. Тем не менее, интенсификация теплоотдачи в прямоугольной полости достигает 30 % при высоте генератора 5 мм, находящегося на расстоянии 10 мм от траншеи.

Заключение

Экспериментально продемонстрированы сложные процессы, которые происходят при взаимодействии двух отрывных турбулентных течений с разными масштабами. Проведенные исследования показали существенное влияние вихревой пелены с повышенной турбулентностью, рождаемой низкой преградой, установленной перед поперечной полостью, на вихреобразование и теплообмен в отрывной области каверны.

По результатам термографической визуализации продемонстрировано, что при попадании точки присоединения от турбулизатора малой высоты, значительно меньшей глубины каверны, в прямоугольную траншею, в ней возникает неустойчивое течение и основной вихрь распадается на две ячейки. Такое явление при отсутствии микротурбулизатора возникает только при углах наклона передней и задней стенок каверны $\varphi < 90^\circ$.

Перестройка течения отражается на поведении коэффициентов давления. На примере прямоугольной каверны показано, что с увеличением высоты мини-препятствия, установленного на передней кромке траншеи, коэффициент давления перед ребром и за каверной растет, а в области отрыва снижается, то есть уровень разрежения в каверне возрастает. При этом темп роста снижается, когда точка присоединения от малого турбулизатора попадает за каверну. При удалении мини-ребра от полости коэффициент давления в траншее остается довольно низким, пока точка присоединения за ним попадает в каверну, а на расстоянии десяти калибров и более по его высоте коэффициент давления в полости вновь возрастает до уровня, которое имеет место при отсутствии малого турбулизатора.

За вихревым генератором значение коэффициента теплоотдачи возрастает по сравнению со случаем его отсутствия, если точка присоединения от малой преграды попадает в полость. Однако из-за ограниченной ширины траншеи интенсификация в полости менее выражена, чем за обратным уступом. Заметное влияние на характеристики теплообмена оказывает как местоположение минипреграды, так и ее высота. В прямоугольной каверне при высоте малого ребра $h_g = 7,5$ мм, установленного на передней кромке, коэффициент теплоотдачи даже уменьшается. Это тот случай, когда точка присоединения за миниребром попадает за каверну. Наибольшее увеличение среднего коэффициента теплоотдачи (в 1,3 раза) имеет место при расположении вихревого интенсификатора

на расстоянии двух калибров по его высоте от прямоугольной полости и оно несколько меньше в трапециевидной каверне. Такое воздействие минитурбулизаторов соизмеримо с влиянием высокой внешней турбулентности и объясняется мелкомасштабной турбулентностью малых интенсификаторов.

По экспериментальным данным можно сделать вывод, что оптимальная высота малой преграды может варьироваться от 1/5 до 1/3 глубины каверны. Местоположение же определяется таким образом, чтобы точка присоединения от миниребра попадала в рециркуляционную область каверны.

Условные обозначения

C_p — коэффициент давления,
 $C_p = 2(p_i - p_0) / \rho U^2$,
 H — глубина каверны, мм,
 h_g — высота вихревого генератора, мм,
 L — ширина полости по ее дну, мм,
 L_w — длина боковой стенки каверны, мм,
 Nu — число Нуссельта, $Nu = \alpha H / \lambda$,
 p — давление, Н/м²,
 Re — число Рейнольдса, $Re_n = U \cdot H / \nu$,
 S_g — местоположение вихревого генератора до каверны, мм,
 U — скорость потока, м/с,

W — длина полости, близкая ширине канала, мм,
 x_R — точка присоединения сдвигового потока,
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К,
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·К,
 ν — кинематическая вязкость, м²/с,
 ρ — плотность, кг/м³,
 φ — угол наклона боковых стенок полости, °.

Индексы:

0 — параметры в основном потоке,
 w — параметры на стенке.

Список литературы

1. **Попов И.А.** Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2009. 560 с.
2. **Леонтьев А.И., Олимпиев В.В.** Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 7–31.
3. **Togun H., Kazi S.N., Badarudin A.** A Review of experimental study of turbulent heat transfer in separated flow // Australian J. of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol. 5, No. 10. P. 489–505.
4. **Перепелица Б.В.** Экспериментальное исследование эволюции поля температуры в канале с гофрированной стенкой при скачкообразном изменении теплового потока // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 6. С. 689–696.
5. **Gad-el-Hak M.** Modern developments in flow control // Appl. Mech. Rev. 1996. Vol. 49, No. 7. P. 365–379.
6. **Castro I.P., Haque A.** The structure of a shear layer bounding a separation region. Part 2. Effects of free-stream turbulence // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 192. P. 577–595.
7. **Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F.** Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46, No. 23. P. 4535–4551.
8. **Dyachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I.** Vortex formation and heat transfer in turbulent flow past a transverse cavity with inclined frontal and rear walls // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. Vol. 51, No. 14. P. 3275–3286.
9. **Neumann J., Wengle H.** DNS and LES of passively controlled turbulent backward-facing step flow // Flow, Turbulence and Combustion. 2003. Vol. 71. P. 297–309.
10. **Neumann J., Wengle H.** Coherent structures in controlled separated flow over sharp-edged and rounded steps // Journal of Turbulence. 2004. Vol. 5, No. 22. 14 p.
11. **Miau J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H.** Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence // AIAA J. 1991. Vol. 29. P. 1140–1148.
12. **Isomoto K., Honami S.** The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment processes over a backward-facing step // Trans. JSME. 1988. Vol. 54B. P. 51–58.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2013 г.