

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОПЕРЕЧНЫХ КАВЕРНАХ ПРИ ДВУХ МОДИФИКАЦИЯХ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

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

В статье рассматриваются два способа воздействия повышенной турбулентности основного потока на отрывное течение в плоской поперечной траншее с различными углами наклона передней и задней стенок. Первый традиционный способ связан с внешней турбулентностью, создаваемой решетками на входе в рабочий канал. Вторым же используемым способом основан на использовании минипреград – вихревых генераторов, установленных перед каверной. Представлены сравнительные результаты экспериментального исследования коэффициентов теплоотдачи при рассмотренных модификациях внешней турбулентности.

Ключевые слова: каверна, отрывной турбулентный поток.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема интенсификации теплообмена в отрывных потоках связана с инженерными приложениями и важна для повышения эффективности теплоэнергетического оборудования [1-3]. В статье рассматриваются эффективные способы воздействия внешних факторов на отрывное течение в поперечной вытянутой каверне, влияющие и на вихревую структуру, и на теплоперенос. Первый традиционный способ связан с внешней турбулентностью, создаваемой решетками на входе в рабочий канал. Вторым – с минипреградами – вихревыми генераторами, расположенными как перед каверной, так и вблизи задней кромки. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований по визуализации вихреобразования, полям давления и температуры в поперечной полости при изменении угла наклона передней и задней стенок в условиях внешнего воздействия минитурбулизаторов в сравнении с влиянием высокой внешней турбулентности набегающего потока. В основном подобные воздействия рассматривались в работах [4-10] при отрыве за обращенным назад уступом, за единичным ребром, системой ребер и полостей, частично в каверне.

Авторы [4-6] установили, 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. Тенденция снижения размеров отрывного пузыря за преградами при высокой турбулентности связана с заметным ростом слоя смещения. Однако более простым способом управления и динамическими, и тепловыми характеристиками

отрывного течения является использование перед преградами минитурбулизаторов [7-10], то есть дополнительных турбулизирующих элементов, существенно меньших геометрических масштабов основного препятствия. Управление отрывным потоком осуществляется за счет введения в отрывную область дополнительного вихревого слоя, приводящего к кардинальным изменениям структуры рециркуляционной зоны, смещению точки присоединения потока и соответственно к перераспределению коэффициентов теплоотдачи. С точки зрения интенсификации теплообмена интерес представляет поиск оптимальных размеров вихреобразователей и их местоположения до преград.

1 ОБОРУДОВАНИЕ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Подробно описание экспериментов с повышенной внешней турбулентностью представлено в работах [5-6]. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН. Сечение рабочего канала аэродинамической трубы составляет 200 на 200 мм, длина 1000 мм. На нижней стенке канала помещалась модель с траншеей между двумя обтекателями. Изучалось обтекание каверны, имеющей следующие размеры: глубина $H = 60$ мм, ширина дна полости $L = 60$ мм, длина в трансверсальном направлении $W = 180$ мм, так что $W/H = 3$ и $H/L = 1$. Были изготовлены модели – для сажемасляной визуализации, для измерения полей давления и тепловых характеристик, а также изучалась система полостей между несколькими ребрами. Эксперименты выполнены при углах наклона боковых стенок $\varphi = 30, 45, 60, 70, 80, 90^\circ$. При этом высота каверны H и длина дна по потоку L оставались по-

стоянными. В зависимости от угла наклона φ изменялась длина боковых стенок L_w .

Измерения проведены в диапазоне скоростей набегающего потока $U = 5 \div 35$ м/с, которым соответствовали значения числа Рейнольдса $Re_H = HU/\nu = 2 \cdot 10^4 \div 1,4 \cdot 10^5$. При всех скоростях пограничный слой перед каверной был турбулентным. при толщине пограничного слоя $\delta \approx 35$ мм. Искусственная турбулизиция потока осуществлялась пассивными источниками повышенной турбулентности типа "перфорированная пластина" и флажковый генератор. Степень турбулентности $Tu_0 = \sqrt{u'^2} / U_0$ измерялась с помощью термоанемометра DISA-55M. Для перфорированного турбулизатора она составила 5 %, а для флажкового генератора – $Tu_0 = 13-15$ %. Естественный уровень турбулентности (без турбулизаторов) был равен 1,2 – 1,5 %.

При исследовании распределения статического давления в каверне модель была снабжена 80 приемниками статического давления, расположенными на передней и задней боковых стенках и дне каверны в 6 сечениях – по два на каждой стенке.

С помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 35 мкм с шириной дорожек 5 мм в режиме постоянного теплового потока осуществлялся нагрев боковых стенок и дна. Поверхность траншеи были препарирована 158 хромель-копелевыми термопарами в трех продольных сечениях на дне, пяти продольных сечениях на боковых стенках и четырех сечениях поперек потока.

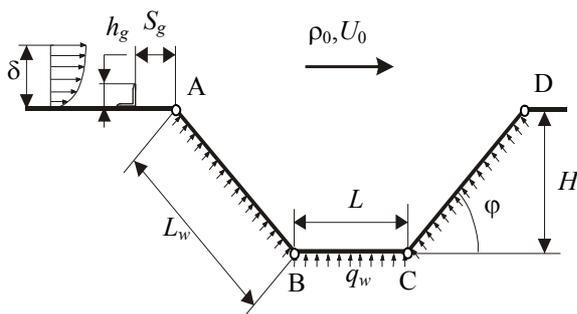


Рисунок 1 - Схема обтекания поперечной каверны с вихрегенератором в виде поперечного ребра, установленного перед полостью

В качестве вихревого генератора перед поперечной траншеей использовалось тонкое поперечное ребро высотой от 2,5 до 10 мм, которое помещалось перед каверной на расстоянии от 0 до 50 мм (рисунок 1). Высота

ребра не превышала $1/3 \delta$ – толщины пограничного слоя и $1/6 H$ – глубины каверны.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВИХРЕОБРАЗОВАНИЮ И КОЭФФИЦИЕНТАМ ДАВЛЕНИЯ

Картина течения на стенках прямоугольной каверны, полученная методом сажемасляной визуализации, для $Re_H = 4 \cdot 10^4$ представлена на рисунке 2. Течение на всех рисунках направлено слева направо. Для получения картин течения на дне каверны смесь осветительного керосина и черной типографской офсетной краски наносилась на оргстекло. Консистенция смеси керосина и краски подбиралась опытным путём для получения более чётких линий тока. На рисунке 2 видно, что картина вихреобразования очень сложная с наличием основного вихря и множеством вторичных зон. Как показано в работе [6] картина отрывного течения сильно зависит от угла наклона боковых стенок траншеи. Так в трапециевидной траншее при $\varphi=60^\circ$ основной вихрь распадается на две ячейки.

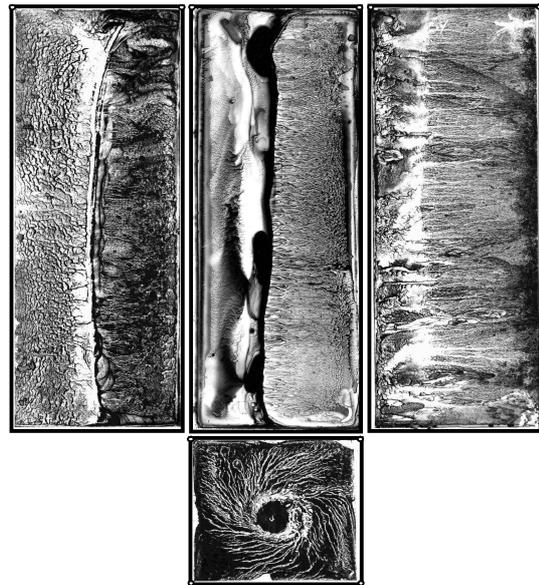


Рисунок 2 - Визуализация течения на стенках каверны при угле наклона боковых стенок $\varphi=60^\circ$. Течение направлено слева направо

Динамика течения видоизменяется под действием внешней турбулентности. Внешняя турбулентность порядка 15% уменьшает вдвое масштаб вихревых структур, особенно во вторичных областях. На рисунке 3 продемонстрирована характерная картина течения у дна трех полостей в межреберных ячейках при низкой и высокой степени турбулентности. Крайне неустойчивое вихреобразование

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОПЕРЕЧНЫХ КАВЕРНАХ ПРИ ДВУХ МОДИФИКАЦИЯХ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

можно отметить во второй ячейке, что связано с образованием встречного течения к основному потоку из третьей ячейки во вторую. Под влиянием внешней турбулентности течение во второй ячейке стабилизируется. Внешняя турбулентность также оказывает доминирующее влияние на слой смешения.

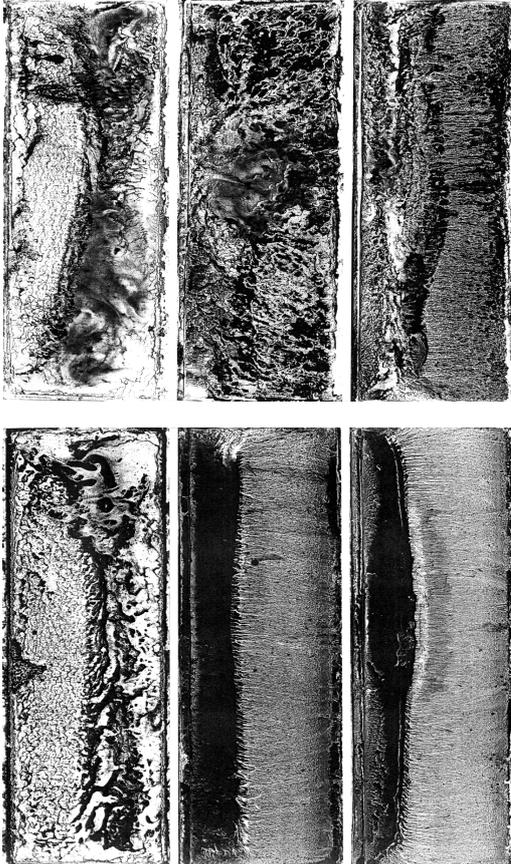


Рисунок 3 - Картина течения у дна межреберных полостей при обтекании системы из четырех ребер высотой 60 мм
Вверху – $Tu_0 = 1,2\%$, внизу – $Tu_0 = 15\%$

Минитурбулизаторы в отличие от турбулизирующих внешних решеток увеличивают уровень турбулентности только в пристенной области. Но их действие на отрывной поток, например за обратным уступом, такое же, как и высокой внешней турбулентности. Согласно [4-5] при внешней турбулентности 15-19% длина отрывной области за обратной ступенькой сокращается на треть, а при наличии минитурбулизатора [6-7] на 20 %.

Воздействие минитурбулизаторов на отрывное течение в каверне исследовано впервые. Получено, что на распределение коэффициентов давления оказывает влияние как высота минипреграды, так и местоположение от каверны. На рис. 4 приведены распреде-

ления коэффициентов давления $C_p = 2(\rho_f - \rho_0) / \rho U^2$ на трех стенках прямоугольной каверны, а также перед каверной и за ней для разных положений интенсификатора S_g в сравнении со случаем отсутствия турбулизатора.

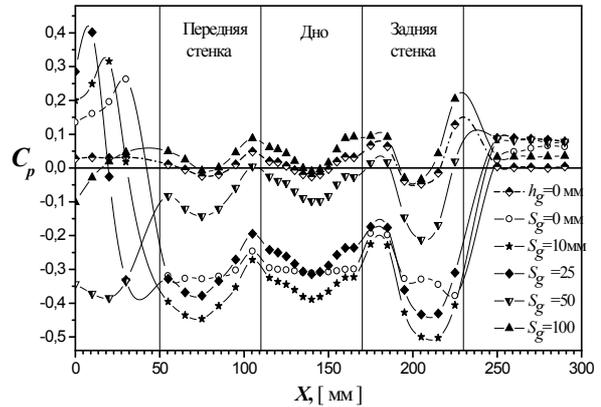


Рисунок 4 - Распределение коэффициента давления в прямоугольной поперечной каверне при наличии минитурбулизатора высотой 5 мм на разных расстояниях S_g от каверны.

Как видно из рис. 4, с увеличением S_g коэффициент давления сначала резко снижается, а потом опять возрастает. Резкое снижение коэффициента давления, обычно соответствующее повышению теплоотдачи в отрывной области, относится к случаям попадания точки присоединения за миниребрами в каверну. Когда точка присоединения находится за каверной, распределение C_p становится близким к случаю нахождения точки присоединения до каверны и к случаю отсутствия минитурбулизатора. Для условий экспериментов предпочтительными расстояниями турбулизатора высотой 5 мм до каверны являются $S_g = 10-25$ мм. Изменяя высоту интенсификатора, было определено, чем выше преграда, тем сильнее уменьшается коэффициент давления в каверне.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ ТЕПЛОТДАЧИ

По результатам термодатного зондирования температуры стенки рассчитаны локальные коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_i = (q_{cm} - q_{потерь}) / (T_{cmi} - T_0).$$

В соответствии с рисунком 5 коэффициенты теплоотдачи в межреберных полостях при высокой внешней турбулентности значительно превышают коэффициенты теплоотдачи при низкой турбулентности. Интенсификация достигает 30%.

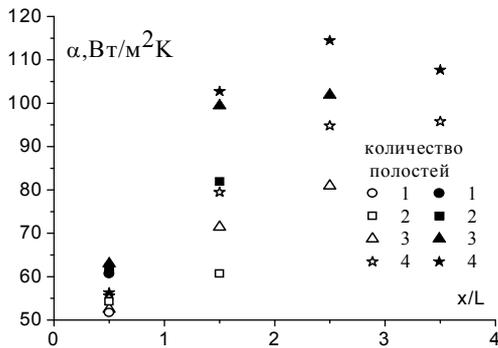


Рисунок 5 - Распределение осредненного по поверхности полости коэффициента теплоотдачи при обтекании от одной до четырех полостей глубиной 60 мм (светлые значки - $Tu_0 = 1,5 \%$; темные - $Tu_0 = 15 \%$)

Еще более ощутимый результат воздействия внешней турбулентности на теплоотдачу имеем в поперечных траншеях.

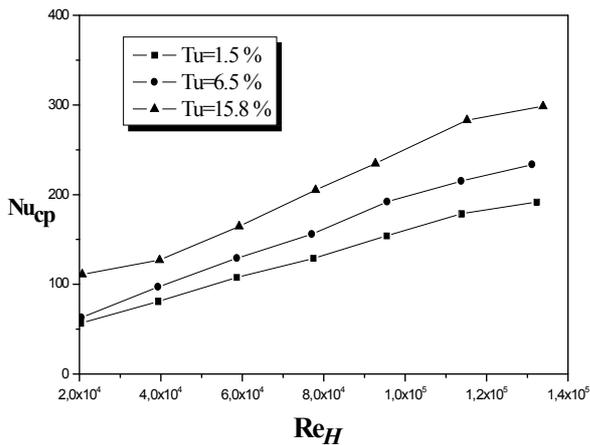


Рисунок 6 - Зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при разной степени турбулентности набегающего потока и угле наклона боковых стенок 60°

С увеличением степени турбулентности основного потока Tu_0 наблюдается постепенный равномерный рост локальных коэффициентов теплоотдачи в поперечной каверне, в большей степени на задней стенке [6]. Усиление теплообмена в каверне с различными углами раскрытия боковых стенок происходит на разную величину, что связано с особенностями вихреобразования для каждого угла. В прямоугольной траншее при $Tu_0 = 6,5\%$ среднее число Нуссельта в среднем возрастает в 1,2 раза, а при турбулентности $Tu_0 = 15,8\%$, которую обеспечивает флажковый генератор турбулентности, - в 1,4

раза. Наибольший эффект зафиксирован в трапецевидной каверне с углом $\varphi = 60^\circ$. Как следует из рисунка 6, среднее по поверхности число Нуссельта при $Tu_0 \sim 16\%$ увеличивается в 1,7 раза.

На рис. 7 приведен относительный средний по всей поверхности полости коэффициент теплоотдачи, нормированный на его среднее значение в прямоугольной полости без минитурбулизатора в зависимости от местоположения миниребра S_g .

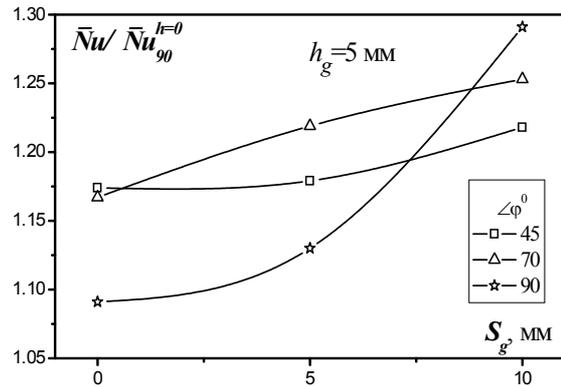


Рисунок 7 - Относительное число Нуссельта в каверне с разными углами φ при наличии на кромке минитурбулизатора в зависимости от его местоположения до каверны

Малое ребро высотой 5 мм находилось на кромке прямоугольной каверны. При $h_g > 5$ мм имеет место уменьшение числа Нуссельта. Это связано с тем, что в этом случае точка присоединения за отрывом, вызванным минитурбулизатором, попадает за каверну.

Из рис. 7 видно, что более значительное увеличение теплоотдачи относится к прямоугольной каверне. Это связано с увеличением длины боковых стенок при других углах наклона и с изменившимся градиентом давления в каверне. Таким образом, наиболее заметная интенсификация теплоотдачи наблюдается для прямоугольной каверны, увеличивающаяся с ростом высоты ребра и расстояния ребра до каверны.

В дальнейшем представляется более перспективным использовать перед уступом разрезное миниребро с большими расстояниями между секциями. Установленное на передней кромке оно не только сокращает отрывную область, но и за счет возникающих между секциями продольных вихрей и возникающей трехмерности течения вызывает существенную интенсификацию теплообмена между рециркуляционной областью и внешним потоком.

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОПЕРЕЧНЫХ КАВЕРНАХ ПРИ ДВУХ МОДИФИКАЦИЯХ ВНЕШНЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Следует отметить также то, что на теплоперенос в поперечных кавернах может оказывать влияние и процесс влагопереноса турбулентным потоком, в том числе под влиянием градиента температуры, некоторые аспекты которого рассмотрены в работе [11].

4 ВЫВОДЫ

Установлено, что внешняя турбулентность оказывает на отрывное течение в каверне и в системе полостей значительно более сильное воздействие, чем на пограничный слой на плоской поверхности. Это проявляется в интенсификации процессов теплопереноса. При высокой степени турбулентности теплоотдача в каверне возрастает на 40- 70% в зависимости от угла φ .

Используя минитурбулизаторы, можно добиться тех же эффектов, что и при увеличении степени турбулентности набегающего потока, особенно в воздействии на теплообмен. Достаточно сильное влияние можно объяснить более мелкомасштабной турбулентностью малых интенсификаторов по сравнению с турбулентностью, генерируемой решетками.

Экспериментально продемонстрированы сложные процессы, которые происходят при взаимодействии двух отрывных течений с разными масштабами. Проведенные исследования показали существенное влияние вихревой пелены с повышенной турбулентностью, рождаемой маломасштабной преградой, на вихреобразование и теплообмен в отрывной области в поперечной полости. При попадании точки присоединения от малого интенсификатора в поперечную каверну коэффициент давления в области отрыва снижается, а максимальное значение коэффициента теплоотдачи возрастает по сравнению со случаем отсутствия вихревого генератора. Сильное влияние на характеристики теплообмена оказывает как месторасположение минипреграды, так и ее высота.

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) / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Известия РАН, Энергетика. – 2011 - № 1. - С. 7-31.

3. Togun H. A Review of Experimental Study of Turbulent Heat Transfer in Separated Flow / H. Togun, S.N. Kazi, A. A. Badarudin // Australian J. of Basic and Applied Sciences. – 2011. - Vol. 5, N10. - P. 489-505.

4. Castro I. P. The structure of a shear layer bounding a separation region. Part 2. / I. P. Castro, A. Haque // Effects of free-stream turbulence. J. Fluid Mech. - 1988. - Vol. 192. - P. 577-595.

5. Terekhov V.I. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence / V.I. Terekhov, N.I. Yarygina, R.F. Zhdanov // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. - Vol. 46, No 23. - P. 4535-4551.

6. Dyachenko A.Yu. Vortex formation and heat transfer in turbulent flow past a transverse cavity with inclined frontal and rear walls / A.Yu. Dyachenko, V.I. Terekhov, N.I. Yarygina // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. - Vol. 51, No 14. - P. 3275-3286.

7. Neumann J. DNS and LES of passively controlled turbulent backward-facing step flow / J. Neumann, H. Wengle // Flow, Turbulence and Combustion. - 2003. - Vol. 71. - P. 297-309.

8. Neumann J. Coherent structures in controlled separated flow over sharp-edged and rounded steps / J. Neumann, H. Wengle // Journal of Turbulence. - 2004. - Vol. 5, No 22. - 14 p.

9. Miao J. Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence. / J. Miao, K.C. Lee, M.H. Chen, J.H. Chou // AIAA J. - 1991. - Vol. 29. - P. 1140-1148.

10. Isomoto K. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment processes over a backward-facing step / K. Isomoto, S. Honami // Trans. JSME. - 1988. - Vol. 54B. - P. 51-58.

11. Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И. Влияние градиента температуры на влагоперенос в пористых материалах // Ползуновский вестник. - 2012. - № 3/1. - С. 17-21.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 12-08-00249) и Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт N 14.518.11.7015).

Дьяченко А.Ю., к.т.н., с.н.с.,
Терехов В.И., д.т.н., зав. лабораторией,
Ярыгина Н.И., к.т.н., в.н.с.
Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск,
тел. (8383)3165336, e-mail: terekhov@itp.nsc.ru