

С. В. ЕРШОВ, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков;

Ю. А. БЫКОВ, канд. техн. наук, ведущий инженер, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков;

Я. И. СМУЛЬСКИЙ, ведущий инженер, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация;

К. А. ШАРОВ, канд. техн. наук, стар. науч. сотр., . Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация;

В. И. ТЕРЕХОВ, д-р техн. наук, зав. лаб., Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПАССИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Приведены результаты экспериментального и численного исследования течения в канале с обратным уступом при наличии минитурбулизатора. Показано, что наличие препятствия перед уступом вызывает деформацию профилей скорости и турбулентных пульсаций, а также к значительному изменению длины зоны отрыва за уступом. Продемонстрировано удовлетворительное согласование численных и экспериментальных данных при наличии и отсутствии препятствия.

Ключевые слова: пограничный слой, отрыв потока, ламинарно-турбулентный переход.

Введение. Совершенствование систем охлаждения, применяемых в энергетике, химической промышленности, электронике и т.п. требует использования современных средств улучшения теплообмена. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов повышения эффективности теплообменного и теплотехнического оборудования является интенсификация теплообмена в каналах. Наиболее простыми и тем привлекательными являются поверхностные интенсификаторы теплообмена в форме поперечных ребер, выступов и углублений, формирующие различного типа вихревые структуры в отрывном течении [1]. Такие элементы, имея существенно меньшие масштабы по сравнению с основным отрывным потоком, могут приводить к значительной перестройке течения. При этом основной трудностью использования пассивных элементов является необходимость точного прогнозирования сложного процесса интерференции отрывных потоков с различными масштабами. С другой стороны, интенсификация теплопереноса в высокотурбулентных отрывных зонах приводит к увеличению аэродинамических потерь в потоке.

Исследование классического обратного уступа имеет достаточно длинную историю. Некоторые особенности отрывных потоков за уступом, в том числе и в высокотурбулентных условиях, можно найти в работе [2].

Исследование же возможности пассивного воздействия на точку присоединения за обратным уступом не имеет такого широкого диапазона. В экспериментальной работе [3] делался акцент на воздействие неподвижного и пульсирующего ребра, расположенного на четырех калибрах (высот уступа) до обратного уступа, при числе

$Re_H = 10000$. При этом детальная структура потока и воздействие на нее пассивного ребра в работе не изучалась. В этой работе найдена эффективная высота ребра, при которой максимально понижалась длина рециркуляционной области за обратным уступом, причем сокращение отрывной области было значительным и достигало оно приблизительно 30%.

В расчетной работе [4] исследовалось обтекание уступа безградиентным потоком с числом $Re_H = 3000$, при этом отношения высоты ребра к высоте уступа и отношение расстояния между ребром и уступом к высоте уступа, имели значения, найденные в работе [3] и соответствующие наименьшей рециркуляционной области.

Задача численного моделирования течения за обратной ступенью является эталонным тестом для различных методов, тем не менее, использование различных моделей турбулентности могут давать различие в оценке длины зоны отрыва в 20-25% [5]. Наличие нескольких препятствий, вызывающих отрыв потока, существенно усложняет картину течения. Выполнение численного моделирования позволяет не только детально исследовать особенности течения, но и выявить закономерности влияния размеров препятствий на характеристики потока, в том числе, и коэффициенты теплообмена.

Экспериментальные исследования. Экспериментальное исследование аэродинамической структуры взаимодействия малых вихревых возмущений с отрывным потоком за прямым обратным уступом выполнено в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск). Измерения выполнялись методом цифровой трассерной визуализации PIV. Экспериментальный стенд представлял собой рабочий канал прямоугольного сечения (рис. 1) размерами 21x150 мм. На расстоянии 0,6 м от входа канала находится обратный уступ высотой 9 мм. В качестве генератора вихревых возмущений служила поперечная квадратная призма с размерами 3x3 мм. В эксперименте расстояние от призмы до точки отрыва потока было

фиксированным $S = 40$ мм. Число Рейнольда, построенное по высоте уступа и максимальной скорости $U_c = 30$ м/с было равно $Re_H = 15000$. Средняя температура потока была $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Выход потока осуществлялся в атмосферу.

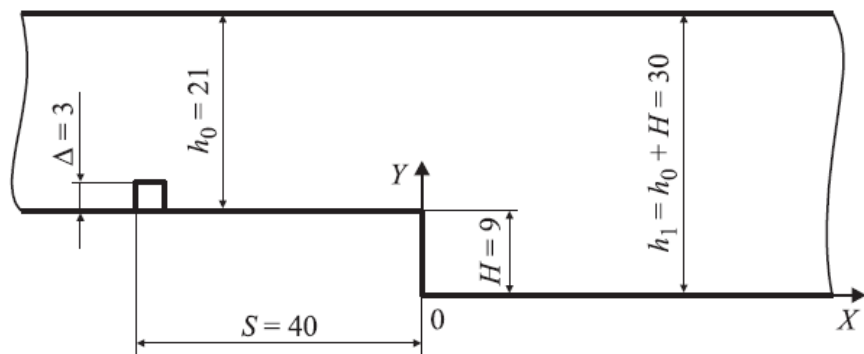


Рис. 1 - Схема рабочего участка канала (все размеры в мм)

Для измерения полей скоростей использовался метод цифровой трассерной визуализации PIV. Комплекс PIV оснащен двумя импульсными лазерами, которые синхронизованы с цифровой камерой для измерения двумерного поля скорости. В представленных экспериментах интервал времени между вспышками лазера был 20 мкс, а их длительность 5 нс. Комплекс снабжен компьютерным кодом, позволяющим определять как осредненные характеристики течения, так и статистические моменты второго и более высокого порядка. Для задымления воздушного потока использовался генератор трассеров с рабочей жидкостью Safex Fog Fluid Standard. Средний диаметр частиц трассеров ~ 1.0 мкм. С целью

увеличения пространственного разрешения вся измерительная область была поделена на участки. Размер участка составлял 30×40 мм. Для каждого участка было получено по 4000 парных мгновенных снимков. Расчетное поле снимка 1360×1025 пикселей делилось на ячейки размером 64×64 пикселей. Расчет полей скоростей проводился с использованием итеративного кросскорреляционного алгоритма с перекрытием 50% расчетных областей. Затем происходил отбор по отношению сигнал/шум и отбор по локальному среднему, в основе которого лежат соображения о локальной непрерывности поля скорости.

Численные исследования. Для численного моделирования трехмерного вязкого течения в канале использовался разработанный явный метод [7] интегрирования уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Метод имеет второй порядок точности по пространственным координатам. Для замыкания использовалась оригинальная версия модели турбулентности SST Ментера [8]. Метод основан на модифицированном методе Годунова и использует многоблочные расчетные сетки H-типа. Расчетная область включала в себя часть канала, входная граница располагалась на расстоянии 50 мм от уступа, выходная – на расстоянии 120 мм от уступа, ширина канала составляла 20 мм с условием периодичности на вертикальных стенках. На входной границе задавались распределения скоростей и среднеквадратичных пульсаций скорости, полученные в результате эксперимента. Значения для параметра k модели турбулентности задавались из предположения $k = 1.5u'^2$, где u' – среднеквадратичная пульсация скорости. Расчетная сетка состояла из $84 \times 75 \times 5$ ячеек, значения u^+ для ячеек у стенки имели порядок около 1.

Результаты исследований. Для проверки возможностей методов было выполнено сравнение результатов для классического случая – течения в канале с обратным уступом без дополнительных преград. Результаты представлены на рис. 2 – распределение безразмерной продольной скорости, на рис. 3 – графики безразмерных среднеквадратичных пульсаций скорости. В целом показывая достаточное соответствие, наблюдается аналогичный эффект размывания турбулентного следа за кромкой уступа.

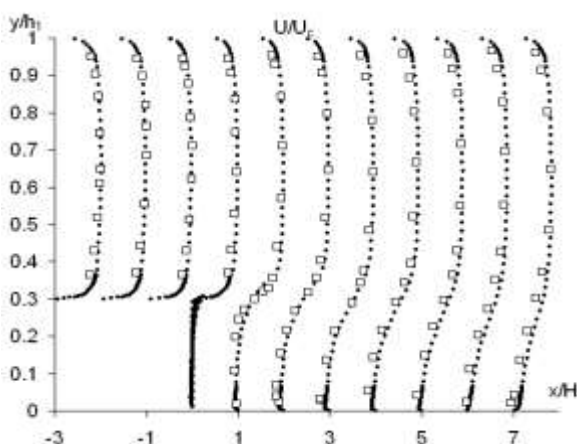


Рис. 2 - Распределение по высоте продольной скорости для канала без преграды; ●●● – расчет, □□□ – эксперимент

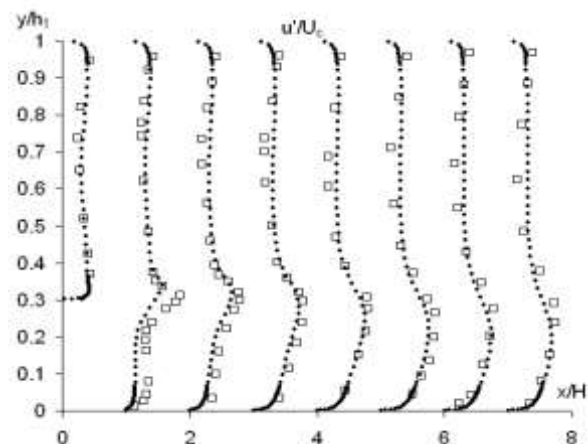


Рис. 3 - Распределение по высоте среднеквадратичной пульсации скорости для канала без преграды; ●●● – расчет, □□□ – эксперимент

В результате экспериментальных и численных исследований были получены распределения продольной скорости и среднеквадратичных пульсаций скорости по

высоте канала. Значения среднеквадратичных пульсаций скорости для численного моделирования получены из значений параметра k модели турбулентности. На рис. 4 представлены графики распределения безразмерной продольной скорости для канала с преградой, на рис. 5 – графики безразмерных среднеквадратичных пульсаций скорости.

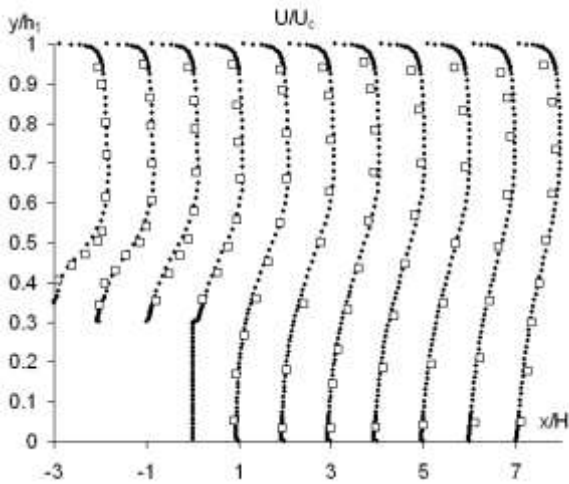


Рис. 4 - Распределение по высоте продольной скорости для канала с преградой; ●●● – расчет, □□□ – эксперимент

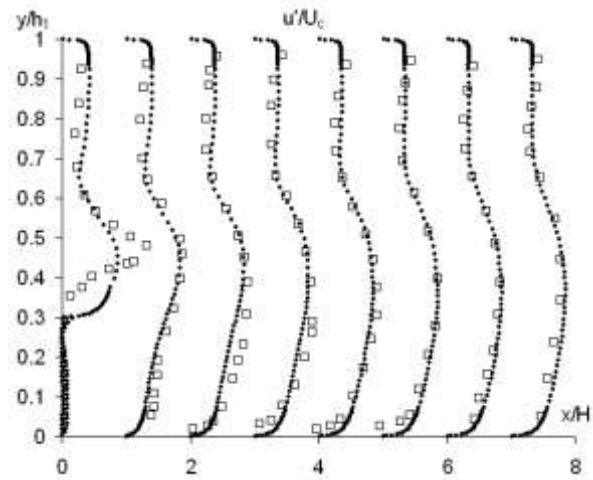


Рис. 5 - Распределение по высоте среднеквадратичной пульсации скорости для канала с преградой; ●●● – расчет, □□□ – эксперимент

В целом графики показывают достаточно удовлетворительное соответствие эксперимента и расчета, в большей степени – на выходе из канала. В области кромки уступа ($x/H = 0$) расчет дает заниженное значение турбулентных пульсаций, размывая турбулентный след от преграды, что вероятно связано с недостаточным сгущением расчетной сетки в этой области.

По результатам исследований видно, что наличие преграды вносит значительные изменения в профили скорости, вызывая также изменение длины зоны рециркуляции за уступом. Расчет дает величину отношения длин для канала с преградой и без нее в районе 0,81, что весьма близко к экспериментальному результату в 0,7, полученному в работе [7].

Выводы. Приведенные результаты исследований показывают, что наличие дополнительных преград перед уступом значительно влияют на величину турбулентных пульсаций в потоке, что, вероятнее всего, является причиной изменения величины зоны рециркуляции за уступом. Внесенные возмущения в поток позволяют интенсифицировать процессы теплообмена в рециркуляционной зоне. Дальнейшие исследования для преград различной формы, размера и расстояния до уступа позволят выявить важные закономерности, дающие возможность совершенствовать проточные части теплообменных устройств. Также в процессе исследований показаны возможности численного моделирования течений со сложной структурой взаимодействующих турбулентных отрывных течений.

Список литературы: 1. Попов И. А. Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена [Текст] / И. А. Попов // КГТУ им. А.Н.

Туполева, Казань. – 2009. – 560 с. **2.** *Terekhov V. I.* Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence [Текст] / *V. I. Terekhov, N. I. Yarygina, R. F. Zhdanov* // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2003. – Vol. 46, № 23. – P. 4535–551. **3.** *Miau J. J.* Control of Separated Flow by a Two-Dimensional Oscillating Fence / *J. J. Miao, K. C. Lee, M. H. Chen, J. H. Chou* // *AIAA J.* – 1991. – Vol. 29. – P. 1140-1148. **4.** *Neumann J.* DNS and LES of Passively Controlled Turbulent Backward-Facing Step Flow / *J. Neumann, H. Wengle* // *Flow, Turb. and Comb.* – 2008. – Vol. 71. – P. 297-310. **5.** *Kim J.-Y.* Comparison of near-wall treatment methods for high Reynolds number backward-facing step flow / *J.-Y. Kim, A. J. Ghajar, C. Tang, G. L. Foutch* // *Int. J. of Comp. Fluid Dynamics* – 2005. – Vol. 19, No. 7. – P. 493-500. **6.** Терехов В. И. Интеференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления / *В. И. Терехов, Я. И. Смольский, К. А. Шаров* // ПЖТФ. – 2012. – т. 38, вып. 3. – С.46-53. **7.** Гнесин В. И. Численное исследование аэроупругих характеристик лопаточного венца турбомшины, работающей на нерасчетном режиме / *В. И. Гнесин, Ю. А. Быков* // Пробл. машиностроения. – 2004. – 7, №1. – С. 31-40. **8.** *Menter F. R.* Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / *F. R. Menter* // *AIAA Journal.* – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605.

Поступила в редколлегию 18.09.2013

УДК 621.165

Расчетно-экспериментальное исследование течения за обратным уступом при наличии пассивного управления / Ершов С. В., Быков Ю. А., Смольский Я. И., Шаров К. А., Терехов В. И. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. – № 56 (1029). – С.199-203. – Бібліогр.: 8назв.

Наведено результати експериментального та чисельного дослідження течії в каналі з зворотним уступом при наявності мінітурбулізатора. Показано, що наявність перешкоди перед уступом спричиняє деформацію профілів швидкості та турбулентних пульсацій, а також до значної зміни довжини зони відриву за уступом. Продемонстровано достатнє погодження чисельних та експериментальних даних при наявності та відсутності перешкоди.

Ключові слова: примежовий шар, відрив потоку, ламінарно-турбулентний перехід.

Experimental and numerical investigation results of backward-facing step flow with turbulator are presented. The presence of obstacle before step deforms velocity and turbulent pulsation profiles, and causes significant change of separation bubble length. Satisfactory fit of experimental and numerical results in presence and absence of the obstacle is shown.

Keywords: boundary layer, flow separation, laminar-turbulent transition.