УДК 536.24: 532

ОСОБЕННОСТИ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА ЗА ПРЕПЯТСТВИЕМ В КАНАЛЕ

Мазо А.Б.[1], Калинин Е.И.[1], Молочников В.М.[2]

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
[2]*Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, Россия*

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-01-00368, 13-08-00359, 13-08-00504, 13-08-97050, и Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения 8078, 8714.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты лабораторных исследований и прямого численного моделирования трехмерного отрывного течения за поперечным полуцилиндрическим выступом в канале на ламинарном и переходном к турбулентному режимах течения. Получены данные о динамике структуры течения, эволюции крупномасштабных вихревых структур в следе за препятствием, зарождении и развитии пульсаций скорости и давления при ламинорно-турбулентном переходе.

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях [1] установлено, что при течении вязкой жидкости в канале с препятствием наблюдается отрыв потока и формирование упорядоченных крупномасштабных вихревых структур, которые квазипериодически выносятся из области отрыва. При достаточно больших значениях числа Рейнольдса в следе происходит распад крупных вихрей на каскад мелких с переходом к турбулентности. Механизм формирования и турбулентного распада этих структур изучался в работах [1, 2] однако до настоящего времени нет общей точки зрения на причины данного феномена.

В предыдущих работах авторов [3 - 5] были представлены данные дымовой визуализации, PIV измерений мгновенных векторных полей скорости потока и завихренности, а также термоанемометрических измерений скорости в отрывном течении за поперечным выступом в прямоугольном канале. Визуализация течения в плоскости симметрии канала показала, что с ростом числа Рейнольдса на внешней границе рециркуляционной области за выступом сначала возникают колебания струек дыма, затем появляются гребнеобразные возмущения. При определенном критическом значении числа Рейнольдса на некотором расстоянии от выступа формируются крупномасштабные вихревые структуры. Анализ спектров пульсаций скорости потока и поверхностного трения, полученных по данным термоанемометрических измерений, показал наличие выраженного максимума на частоте образования этих структур. Значение безразмерной частоты (числа Струхаля), соответствующее положению этого максимума, оказалось близким к частоте схода периодических вихрей. На основании этих наблюдений был сделан вывод, что при отрыве потока за выступом в канале наиболее вероятным механизмом формирования крупных вихрей является развитие конвективной неустойчивости сдвигового слоя, а дальнейшая эволюция вихрей и развитие турбулентности определяются глобальной динамикой течения в канале. Этот вывод базировался на данных визуальных исследований только в плоскости симметрии канала; при этом пространственные особенности течения были изучены недостаточно подробно. Так, в работах [3, 4] были приведены результаты визуализации течения за поперечным ребром в канале в световом ноже, расположенном параллельно плоскости, на которой установлено ребро, в непосредственной близости от нее. Однако съемки велись обычной (не скоростной) камерой и, по-видимому, при недостаточной мощности светового ножа. Это не позволило выявить детали структуры течения.

© Мазо А.Б., Калинин Е.И., Молочников В.М.

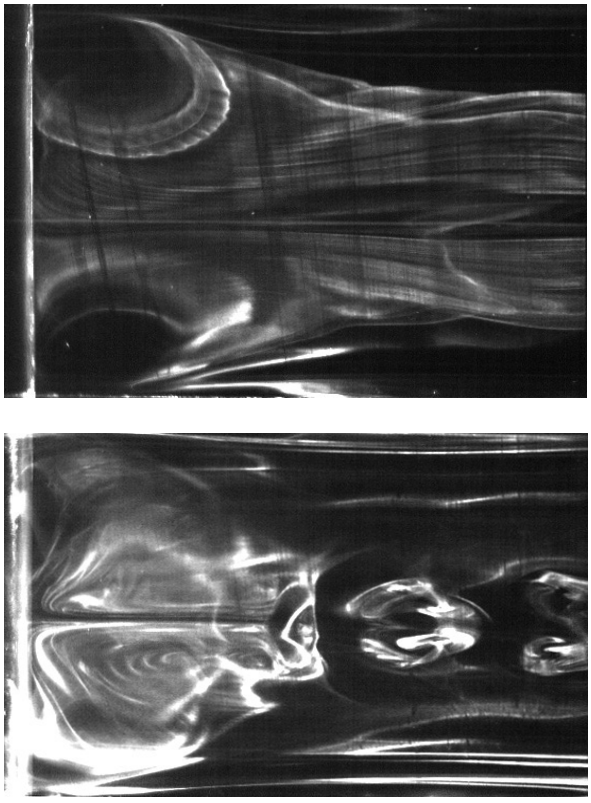
Более подробный анализ полученных результатов показал, что ламинарно-турбулентный переход при отрыве потока за препятствиями в каналах имеет особенности, связанные с неустойчивостью течения в направлении трансверсальной координаты. Для выявления этих особенностей в рамках настоящей работы выполнены детальные визуальные исследования структуры течения за полуцилиндрическим выступом в канале на последовательных этапах перехода к турбулентности. Визуализация потока проводилась во взаимно перпендикулярных плоскостях: вертикальной плоскости симметрии канала (и параллельных этой плоскости) и в горизонтальной плоскости, параллельной стенке, на которой установлен выступ, на различных расстояниях от нее. Экспериментальные исследования дополнены результатами прямого численного моделирования рассматриваемого течения, достоверность которых подтверждается сопоставлением с данными визуализации и ранее выполненных термоанемометрических и PIV-измерений скорости потока и завихренности за выступом. Сочетание эксперимента и численного моделирования позволило составить ясное представление о развитии структуры отрывного течения за препятствием в канале и формировании крупномасштабных вихревых структур на поздних стадиях перехода к турбулентности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная установка, в которой проводились исследования, подробно описана в [7].

Изучался отрыв потока за полуцилиндрическим поперечным выступом, расположенным в канале прямоугольного поперечного сечения высотой H = 20 и шириной 50 мм с плавным входом, выполненным по лемнискате Бернулли. Выступ устанавливался на расстоянии 106 мм от входного сечения рабочего участка и имел высоту h (радиус сечения R), равную 3 мм. Расход воздуха через рабочий участок обеспечивался вакуумными насосами и поддерживался постоянным при помощи набора критических сопел с погрешностью не более 0.25%.

Эксперименты проводились в диапазоне изменения числа Рейнольдса $\mathrm{Re_H} = U_0 H/\nu = 390\ldots2930$, рассчитанного по средней скорости потока U_0 в рабочем участке, высоте канала H и кинематической вязкости воздуха ν. Соответствующее число Рейнольдса, вычисленное по высоте препятствия h, изменялось в диапазоне $\mathrm{Re_h} = 58.5\ldots439.5$. Визуализация течения выполнялась методом дымящейся проволочки [3]. Съемки картины течения проводились в световом ноже в плоскости симметрии канала и в параллельных ей плоскостях на расстоянии 3; 6; 9; 12 и 18 мм, а также и в плоскостях, параллельных нижней стенке, на расстоянии 1, 2, 3 и 4 мм от неё. Световой нож создавался непрерывным лазером KLM-532/5000, съемки проводились монохромной скоростной камерой Fastec HiSpec с частотой съемки 800 кадр/с при разрешении кадра 1280×1024 пикселей.



а

б

Рис.1 Визуализация течения при $\mathrm{Re_H} = 1553$ ($\mathrm{Re_h} = 233$) в плоскостях, параллельных нижней стенке на высоте 1 мм (*а*) и 3 мм (*б*) от нее.

По данным визуализации потока в плоскости симметрии канала установлено, что формирование крупномасштабных поперечных вихревых структур в слое смешения за вы-

ступом начинается при критическом значении числа Рейнольдса $Re_H \approx 1300$ ($Re_h = 195$). С увеличением Re_H интенсивность этих структур возрастает, а область начала их формирования смещается в сторону выступа. Установлено, что на всех рассмотренных режимах непосредственно за выступом наблюдается сложное кругообразное движение жидкости от боковых стенок к центру канала. Это движение отображается на визуализации картины течения в форме двух симметричных угловых вихрей (рис. 1).

Часть жидкости, вовлеченной в это движение, поступает во внешний поток и формирует парные продольные ламинарные вихри вблизи нижней стенки на расстоянии приблизительно четверти расстояния от боковых стенок канала (рис. 2).

С ростом числа Рейнольдса круговое движение жидкости от боковых стенок канала к его центру сохраняется, однако масштаб этого движения по продольной координате уменьшается, зона начала формирования вихревых сгустков смещается в сторону выступа вверх по потоку. При этом область, занимаемая этими сгустками, расширяется как по трансверсальной координате, так и в сторону нижней стенки (рис. 2).

Процесс сопровождается дроблением крупных вихрей на более мелкие вихревые структуры, усиливаются пульсации потока, течение в следе за препятствием ниже линии присоединения приобретает черты турбулентного режима.

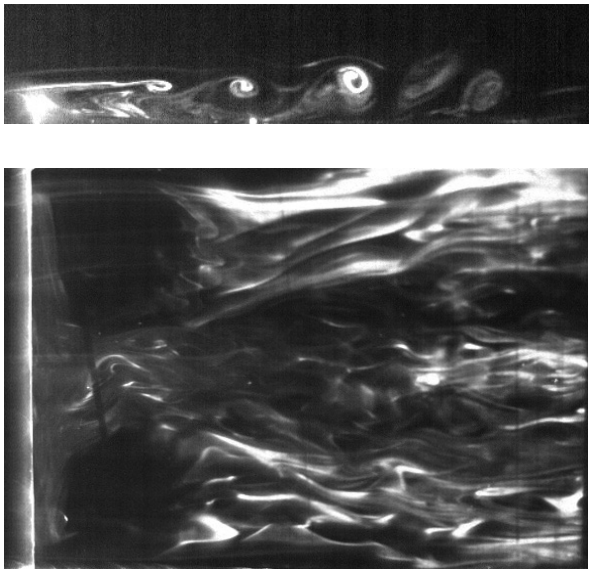


Рис.2 Визуализация течения при $Re_H = 2700$ ($Re_h = 405$): *а* – в вертикальной плоскости на оси канала; *б* – в горизонтальной плоскости в 1 мм от нижней стенки.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для составления более полной картины ламинарно-турбулентного перехода в канале с полуцилиндрическим выступом, получения количественных характеристик средних полей скорости и давления и их пульсаций было выполнено прямое численное моделирование исследуемого течения в пакете Ansys Fluent 14.5 (лицензия #625482 ANSYS Academic Research). Расчетная область в точности соответствовала конфигурации рабочего участка лабораторной установки. Решалась трехмерная нестационарная задача Навье-Стокса в переменных «скорость-давление» для несжимаемой жидкости при числах Рейнольдса в диапазоне $1100<Re_H<3200$ ($165<Re_h<480$). На стенках канала т выступе ставились граничные условия прилипания, во входном сечении задавался равномерный профиль продольной скорости и нулевое давление, в выходном сечении канала – «мягкие» граничные условия.

Отметим, что вычисленное по высоте препятствия *h* число Re_h отвечает за отрыв и присоединение потока, формирование вихревых структур в ближнем следе за телом, зарождение и развитие возмущений потока в виде турбулентных пульсаций скорости и давления. Роль числа Рейнольдса Re_H сводится к развитию, либо подавлению возмущений в области вниз по потоку. Эти соображения были учтены при построении неструктурированной расчетной сетки с сильным сгущением в области препятствия и отрыва-присоединения, а также в пограничном слое на нижней стенке канала. Общее количество ячеек сетки – 1.5 млн., при этом пространственный шаг сетки l в областях сгущения приблизительно равен 0.01, а в зонах разрежения – 0.3 (все размеры нормированы на высоту препятствия *h*). Безразмерный шаг по времени $\tau=0.02$. Данные параметры сетки по порядку величины соответствуют колмогоровским пространственным и временным мас-

штабам диссипативных вихрей для указанных выше значений чисел Рейнольдса:

$0.01 < \lambda_h = Re_h^{-3/4} < 0.022$, $0.01 < \tau_h = Re_h^{-1/2} < 0.078$;

$0.0024 < \lambda_H = Re_H^{-3/4} < 0.0052$, $0.018 < \tau_H = Re_H^{-1/2} < 0.03$.

Визуализация результатов расчета осуществлялась с помощью моделирования движения пассивных частиц, выпускаемых с виртуальных «дымящихся проволочек», расположенных вблизи выступа.

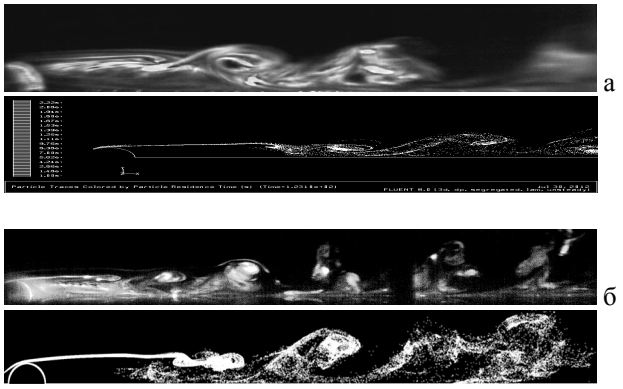


Рис.3 Результаты визуализации (сверху) и расчета (снизу) мгновенной картины течения за выступом в вертикальной лоскости: *а* – Re_H=1800 (Re_h = 165); *б* – 3200 (480).

Для тестирования расчетной схемы была проведена серия расчетов при числах Рейнольдса Re_H=1100; 1500; 1800 и 3200 (Re_h = 165; 225; 270 и 480). Выполнены сравнения картины течения, включая размеры отрывной области, конфигурацию вихревых сгустков и частоту схода вихрей, профилей скорости потока и амплитуды пульсаций компонент скорости с экспериментальными данными визуализации и PIV измерений [6, 7, 9]. Во всех случаях получено вполне удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Некоторые из них представлены на рис. 4, 5.

Расчетная картина течения в различных плоскостях соответствует визуализации потока как при числах Рейнольдса, соответствующих начальным этапам формирования поперечных вихрей и зарождения пульсаций (рис. 3, а), так и на режимах, близких к развитой турбулентности в канале (рис. 3, б, рис. 4).

Достигнуто также удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных осредненных профилей скорости в различных сечениях канала и их пульсаций.

На рис. 4 показаны построенные по результатам численного моделирования сложные пространственные спиралевидные траектории движений жидкости от боковых стенок к центру канала за выступом при Re_H = 1100, Re_h = 165 (*а*); и Re_H = 1500, Re_h = 225 (*б*). В последнем случае хорошо видны образование и унос вихревых сгустков в центральной области и переход к турбулентности в следе ниже линии присоединения.

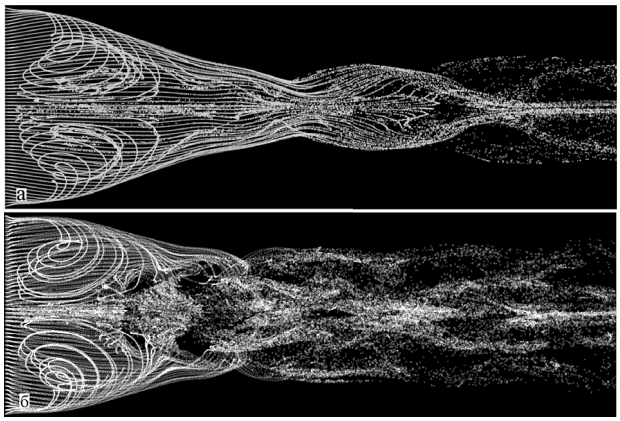


Рис.4 Расчет спиралевидных траекторий частиц: *а* – в ламинарном режиме при Re_H=1100 (Re_h = 165); *б* – на режиме зарождения турбулентности при Re_H=1500 (Re_h = 225).

На рис. 5 представлено расчетное распределение безразмерного (нормированного на скоростной напор) статического давления p за выступом по продольной координате x в плоскости симметрии канала для Re_H=1800 (Re_h = 270). Показаны осредненные по времени и мгновенные графики на безразмерном расстоянии $\Delta y = 0.1$ и 0.7 (что соответствует 0.6 и 4.2 мм при нормировке на диаметр $2R$ выступа) от нижней стенки. Как видно из рисунка, среднее давление в отрывной зоне почти постоянно. Начало роста среднего давления в обоих случаях соответствует координате $x \approx 4.4h$, а присоединение потока на этом режиме происходит при $x \approx 4.75$ [9]. Амплитуда пульсаций p начинает расти при $x \geq 2.5$, что приблизительно соответствует середине рециркуляционной области. Можно заметить, что вблизи стенки и на удалении от нее и среднее давление, и пульсации качественно ведут себя одинаково, однако амплитуда пуль-

саций p при $\Delta y = 0.7$ заметно выше. В зоне положительного градиента давления ($5 < x < 7.5$) наблюдается существенное увеличение амплитуды пульсаций, и именно в этой области происходит формирование крупномасштабных вихревых структур (вихревых сгустков).

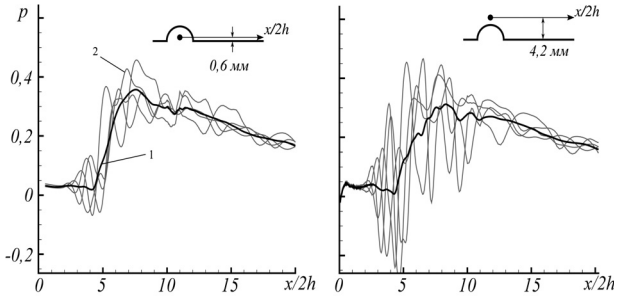


Рис.5 Осредненное (1) и мгновенное (2) распределение давления за выступом для Re_H=1800 (Re_h = 270).

Таким образом, механизм формирования поперечных вихревых структур в слое смешения за выступом в канале при переходе к турбулентности можно представить следующим образом. При отрыве потока над рециркуляционной областью формируется диффузорный участок внешнего течения с неблагоприятным градиентом давления. Интенсивность возвратного циркуляционного движения жидкости максимальна в окрестности плоскости симметрии канала из-за спиралевидного течения от боковых стенок к центру. При низких числах Рейнольдса энергия циркуляции жидкости в замкнутой отрывной области за препятствием отводится во внешний поток через пограничный слой на её внешней границе за счет вязкости; течение на этой границе и внутри рециркуляционной области остается устойчивым, отрывная область замкнута, поперечные вихревые структуры не образуются. При увеличении числа Рейнольдса выше критического вязкие силы не в состоянии отвести поступающую из внешнего потока и накапливающуюся в отрывной зоне за препятствием энергию циркуляции жидкости, течение в зоне положительного градиента давления теряет устойчивость, внутри отрывной области образуются поперечные вихревые структуры возрастающей интенсивности. Периодически эти вихревые сгустки выносятся из рециркуляционной области во внешний поток. Сразу после схода вихря в циркуляция в отрывной зоне падет, ее длина сокращается, и в эту область поступают новые порции жидкости от стенки и из внешнего потока. Далее процесс повторяется.

Важнейшей характеристикой турбулентности является интенсивность пульсаций скорости, определяющая тензор турбулентных напряжений с компонентами τ_{ij}.

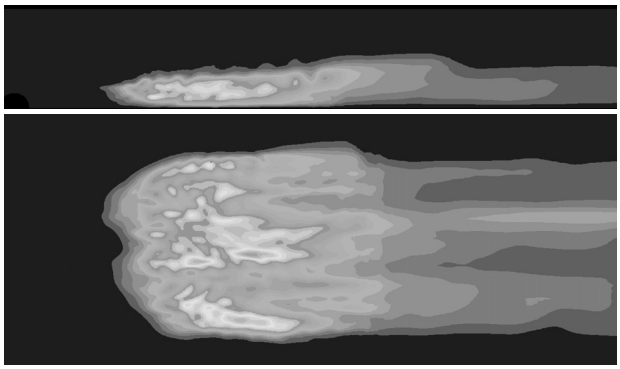


Рис.6 Осредненное поле интенсивности пульсаций скорости в вертикальной (вверху) и горизонтальной плоскости.

По результатам расчета был подсчитан этот тензор и его второй инвариант $T_2 = \tau_{ij}\,\tau_{ji}$. Интенсивность пульсаций можно характеризовать скалярной функцией $T_2^{1/2}$. Осредненное по времени (период осреднения соответствует частоте схода крупных вихрей) поле этой функции в вертикальном и гоизонтальном сечениях при Re_H=3200 (Re_h = 480) представлено на рис. 6. Хорошо видно, что даже при закритических значениях числа Рейнольдса отрывная зона за препятствием является ламинарной, а турбулентность развивается в следе за линией присоединения. Тот же эффект можно видеть на рис. 4, б для режима зарождения турбулентности при Re_H=1500.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены лабораторные исследования и прямое численное моделирование трехмерного отрывного течения за поперечным полуцилиндрическим выступом в канале на ламинарном и переходном к турбулентному режимах течения.

Установлено, что непосредственно за выступом формируется пара симметричных угловых

вихрей, включающих спиралевидное движение жидкости от боковых стенок к центру канала по периферии этих вихрей и застойные области в их центральной части.

При достижении критического числа Рейнольдса за выступом формируются вихревые сгустки, локализованные вблизи плоскости симметрии канала. Размер этих сгустков по трансверсальной координате составляет приблизительно 0.25 ширины канала. С ростом числа Рейнольдса угловые вихри сохраняются, однако их масштаб уменьшается, а зона начала формирования вихревых сгустков смещается в сторону выступа. Процесс сопровождается дроблением крупных вихрей на более мелкие вихревые структуры, усилением пульсаций потока, течение в следе за препятствием ниже линии присоединения приобретает черты турбулентного режима. При этом течение в ближнем следе остается ламинарным.

Механизм формирования вихревых структур за выступом в канале заключается в следующем. При увеличении числа Рейнольдса выше критического, энергия циркуляции жидкости, накапливаемая в замкнутой отрывной области, превышает энергию, отводимую от её границы во внешний поток за счет вязкости. В этих условиях течение в отрывной области в зоне положительного градиента давления теряет устойчивость, образуются поперечные вихревые структуры, которые периодически выносятся из рециркуляционной области во внешний поток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Довгаль А.В., Сорокин А.М. Экспериментальное моделирование периодического вихреобразования при отрыве течения за уступом поверхности // Теплофизика и аэромеханика.– 2002. - Т. 9. - № 2. - С.193 - 200. Dovgal, A.V. and Sorokin, A.M. (2002) “Experimental modeling of vortex shedding at flow separation behind a ledge on a surface”, *Teplofizika i aeromekhanika*, Vol. 9, no. 2, pp. 193 – 200.
2. Диковская И.Д., Довгаль А.В., Сорокин А.М. Переход к турбулентности и образование регулярных вихрей в зоне отрыва пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. - 1999. - Т. 6. - № 1. - С. 27 - 36. Dikovckaya, I.D., Dovgal, A.V. and Sorokin, A.M. (1999) “The transition to turbulence and the formation of regular vortices in the separation of the boundary layer”, *Teplofizika i aeromekhanika*, Vol. 6, no. 1, pp. 27 – 36.
3. Молочников В.М., Михеев Н.И., Паерелий А.А., Хайрнасов К.Р. Отрыв потока за выступом в канале при ламинарном режиме течения // Теплофизика и аэромеханика. - 2008. - Т.15. - №4. - С. 611 - 621. Molochnikov, V.M., Mikheev, N.I., Paereliy A.A. and Khairnasov, K.R. (2008) “Laminar flow separation past a ledge in a channel”, *Teplofizika i aeromekhanika*, Vol. 15, no. 4, pp. 611 – 621.
4. Душина О.А., Молочников В.М., Паерелий А.А. и др. Структура потока за выступом в канале в условиях ламинарно-турбулентного перехода // Теплофизика и аэромеханика. 2010.– Т.17, №3. - С. 349 - 361. Dushina, O.A., Molochnikov, V.M., Paereliy, A.A. (2010) “The structure of the flow past a ledge in a channel in a laminar-turbulent transition”, *Teplofizika i aeromekhanika*, Vol. 17, no. 3, pp. 349 – 361.
5. Dushina O.A., Mikheev N.I., Molochnikov V.M., Paereliy A.A. Generation of large-scale vortical structures in a separated flow behind a rib in transition to turbulence // J. Flow Visualization & Image Processing. - 2011. - 18(4). - P. 275 - 290.
6. Kitoh A., Sugawara K., Yoshikawa H., Ota T. Expansion Ratio Effects on Three-Dimensional Separated Flow and Heat Transfer Around Backward-Facing Steps // J. Heat Transfer. - 2007. - Vol. 129. - P. 1141 – 1155.
7. Abdalla I.E., Yang Z., Cook M. Computational analysis and flow structure of a transitional separated-reattached flow over a surface mounted obstacle and a forward-facing step // Int. J. Comp. Fluid Dyn. – 2009. - Vol. 23. – N 1. - P. 25 – 57.
8. Iwai H., Nakabe K., Suzuki K. Flow and heat transfer characteristics of backward-facing step laminar flow in a rectangular duct // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2000. - N 43. - P. 457 - 471.
9. Nie J.H., Armaly B.F. Reattachment of three-dimensional flow adjacent to backward-facing step // Trans. ASME. - 2003. - Vol. 125. - P. 422 - 428.
10. Rani H.P., Sheu T.W.H., Tsai E.S.F. Eddy structures in a transitional backward-facing step flow // J. Fluid Mech. - 2007. - Vol. 588. - P. 43 – 58.