

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ЧАСТИЧНЫМ ПЕРЕКРЫТИЕМ СЕЧЕНИЯ

О. Н. Кашинский,¹ П. Д. Лобанов,¹ А. С. Курдюмов,¹ Н.А. Прибатурин^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский филиал ИБРАЭ РАН, Новосибирск, Россия

Детальные экспериментальные исследования 3D течений в настоящее время практически отсутствуют. Это чрезвычайно затрудняет процесс разработки новых трехмерных методик теплогидравлического моделирования процессов и делает невозможной детальную верификацию разрабатываемых кодов. В работе поставлена задача экспериментального исследования гидродинамики течения жидкости в осесимметричном кольцевом канале, часть сечения которого перекрыта заслонкой. Представленная геометрия позволяет получить поток со строго выраженной крупномасштабной трехмерной структурой, что вызвано перестроением линий тока жидкости при обтекании преграды и провести оценку степени влияния преграды на локальную структуру потока.

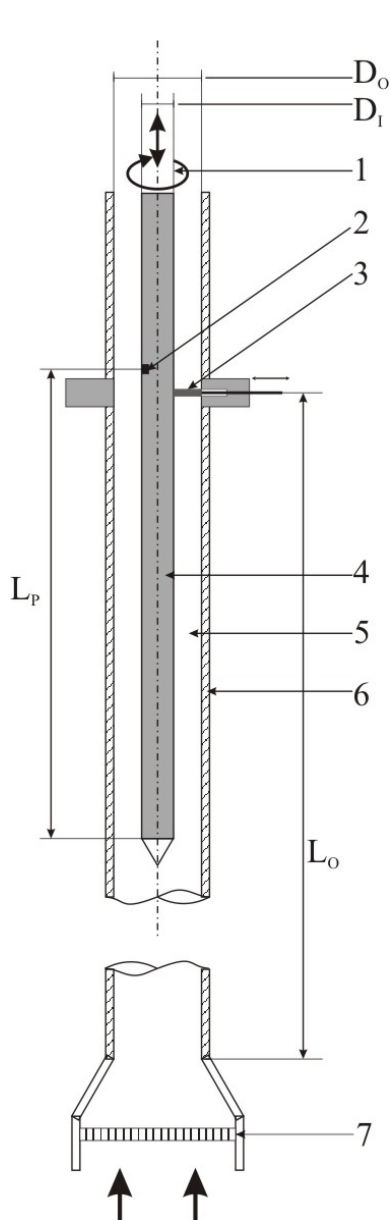
Введение.

При теплогидравлическом обосновании реакторных установок необходимо описание сложных явлений, возникающих при движении потока теплоносителя в каналах различной геометрии. Используемые в настоящее время одномерные методики вычислений обеспечивают лишь консервативные прогнозы, а двух- и трехмерные расчетные коды требуют знания турбулентных характеристик течения и соответствующей эмпирической информации, получаемой из эксперимента. Для тестирования существующих теплогидравлических кодов используется отрывочная экспериментальная информация о движении потоков в вертикальных и горизонтальных трубах, в каналах и сочленениях простой формы, причем большинство таких данных получено за рубежом.

В реальных энергетических установках течения зачастую носят трехмерный характер. Это относится к течениям в тройниках, кранах, искривлениях и прочих составных частях энергетического оборудования. Изучение таких явлений должно идти по пути понимания их физических механизмов с постепенным усложнением задачи исследования. В этой связи особую роль приобретает физическое моделирование как отдельных составляющих комплексного явления, так и, в конечном итоге, моделирование явления в целом. Известно, что ключевые зарубежные компании, являющиеся лидерами на глобальном рынке атомной энергетики, активно развивают подобные методики моделирования. Это позволяет оптимизировать затраты на исследовательскую базу и сократить сроки исследований.

Классическим примером течения с сильным возмущением потока является течение за уступом. Структура такого течения изучена в большом количестве работ [1 - 6]. Другим примером является течение в трубе за диафрагмой – резким сужением сечения. Однако геометрия этих течений имеет двумерный или осесимметричный характер. В то же время представляет интерес изучение течений с существенно трехмерным возмущением.

В данной работе поставлена задача экспериментального исследования гидродинамики течения жидкости в осесимметричном кольцевом канале, часть сечения которого перекрыта заслонкой. Представленная геометрия позволяет получить поток со строго выраженной крупномасштабной трехмерной структурой, что вызвано перестроением линий тока жидкости при обтекании преграды.



- 1 – Механизм вращения внутренней трубы
- 2 – датчик напряжения трения на стенке
- 3 – преграда
- 4 – внутренняя труба
- 5 – кольцевой зазор
- 6 – внешняя труба
- 7 – хонейкомб
- D_0 – диаметр внешней трубы (42.2 мм)
- D_1 – диаметр внутренней трубы (20 мм)

Рисунок 1. Экспериментальная установка.

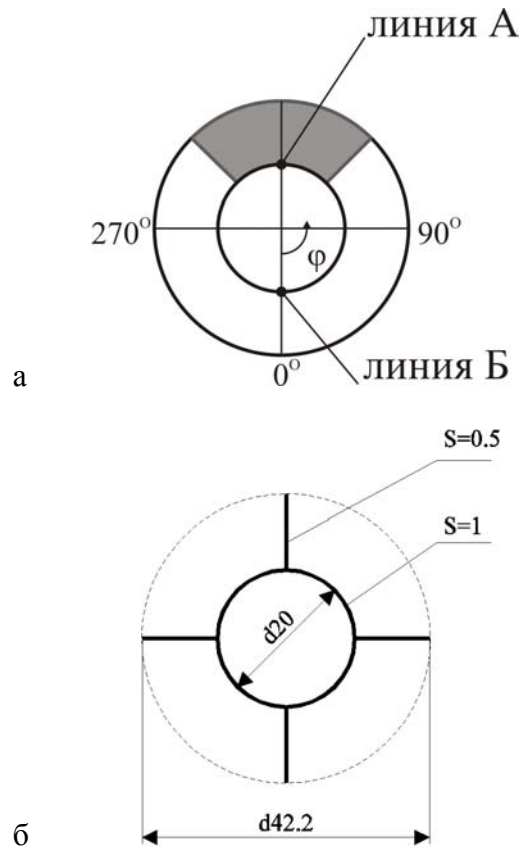


Рисунок 2. Конструктивные элементы, вносящие возмущение в поток жидкости: а - Схема частичного перекрытия сечения кольцевого канала с помощью перегородки; б - Дистанционирующая решетка.

Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур, снабженный системой термостабилизации рабочей жидкости. Рабочим участком является вертикальная труба из оргстекла внутренним диаметром $D_0 = 42.2$ мм и длиной 3600 мм. По оси этой трубы установлена внутренняя металлическая труба с наружным диаметром $D_1 = 20$ мм. Гидравлический диаметр кольцевого канала $D_h = 22.2$ мм. В рабочем участке реализуется восходящее течение жидкости. В кольцевом канале установлена преграда – металлическая пластина высотой 2 мм, перекрывающая четверть поперечного сечения кольцевого канала (область окрашенная серым цветом на рис 2. а). Преграда находится на расстоянии $L_0 = 2700$ мм от входа в рабочий участок.

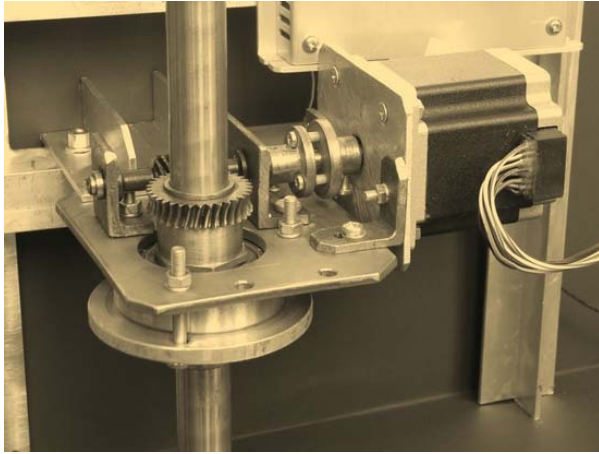


Рисунок 3. Механизм для вращения внутренней трубы

Данная преграда вносит сильное возмущение в течение, имеющее трехмерный характер. Для центрирования внутренней трубы применялись дистанционирующие решетки (рис. 2 б). Эксперименты проводились при расходной скорости жидкости 0.55 м/с.

Внутренняя труба канала с вмонтированным датчиком трения закреплялась на координатном устройстве, при помощи которого производилось перемещение вдоль вертикальной оси канала и вращение трубы (рис. 3). В результате можно было менять положение датчика

относительно преграды, что позволяло проводить исследование поля течения как по продольной, так и по азимутальной координатам. В процессе эксперимента устанавливалось фиксированное расстояние по вертикальной оси от горизонтальной плоскости на уровне верхней поверхности преграды до горизонтальной плоскости на уровне датчика. Это расстояние обозначается как X . При заданном X производилось непрерывное вращение внутренней трубы с датчиком с частотой 1 об*мин⁻¹. Одновременно производилась регистрация сигналов датчика трения на компьютер. После того, как при заданном значении X выполнялся полный оборот внутренней трубы (на 360°), значение X изменялось, и проводилось измерение по углу при новом значении X . Азимутальный угол φ отсчитывался от линии, находящейся в плоскости симметрии (Рис. 2 а).

Результаты измерений.

Азимутальные распределения относительного напряжения трения τ_w/τ_0 на стенке и его относительных пульсаций ε представлены на рисунке 4 для различных значений X . При малых расстояниях от преграды наблюдается значительный «провал» относительного трения в затененной области течения за заслонкой, который располагается в секторе, ограниченном значениями азимутального угла φ от 135° до 225°. В свободном сечении канала наблюдается повышенные по сравнению с невозмущенным потоком значения напряжения трения на стенке трубы. Обтекание преграды потоком приводит к появлению двух выраженных максимумов, расположенных по краям от затененной зоны. Появление этих максимумов вызвано перераспределением части расхода жидкости из области, в которой находится перегородка. В этих секторах наблюдается превышение измеренного напряжения трения на стенке над невозмущенным потоком более чем в 2,5 раза. При удалении от преграды данные особенности распределения напряжения трения на стенке исчезают. Вдали от заслонки наблюдается небольшое превышение напряжения трения на стенке в сравнении с невозмущенным течением в незатененной области течения и пониженное значение напряжения трения в затененной зоне потока. По мере удаления от преграды неравномерность распределения напряжения трения на стенке сглаживается, и при $X = 600$ мм практически становится равномерным. При малых значениях X в области за преградой происходит существенное возрастание интенсивности пульсаций по сравнению с невозмущенным значением. Полное затухание возмущений турбулентного потока, вызванных наличием преграды, происходит при X более 400 мм.

На рисунке 5 представлены распределения осредненного по времени трения на стенке вдоль вертикальных линий, находящихся в плоскости симметрии (линии А и Б на рисунке 2), соответствующие значениям азимутального угла 180° и 0°. Из рисунка 5 а видно, что в

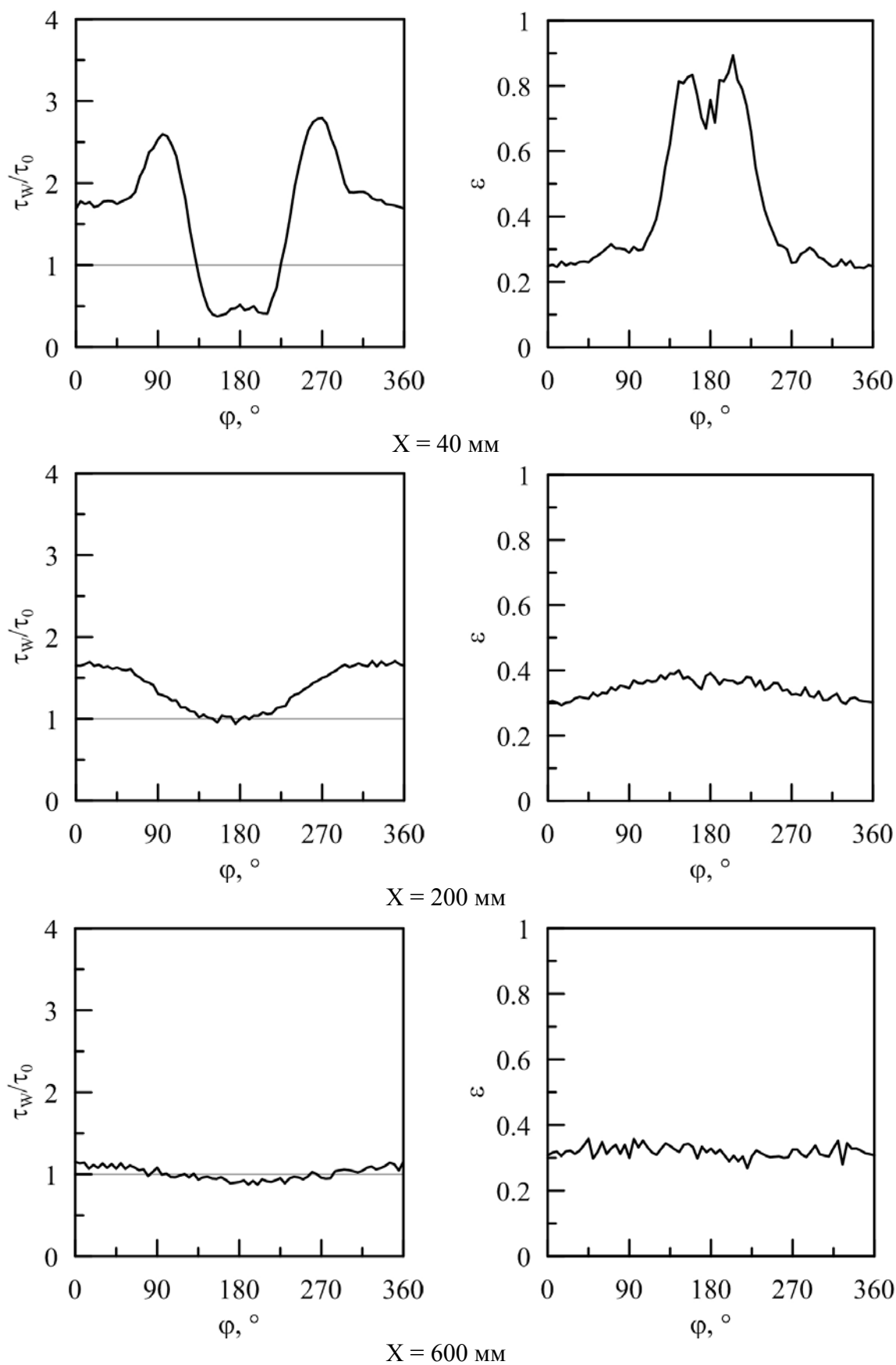


Рисунок 4. Азимутальное распределение напряжения трения на стенке и его пульсаций на поверхности внутренней трубы.

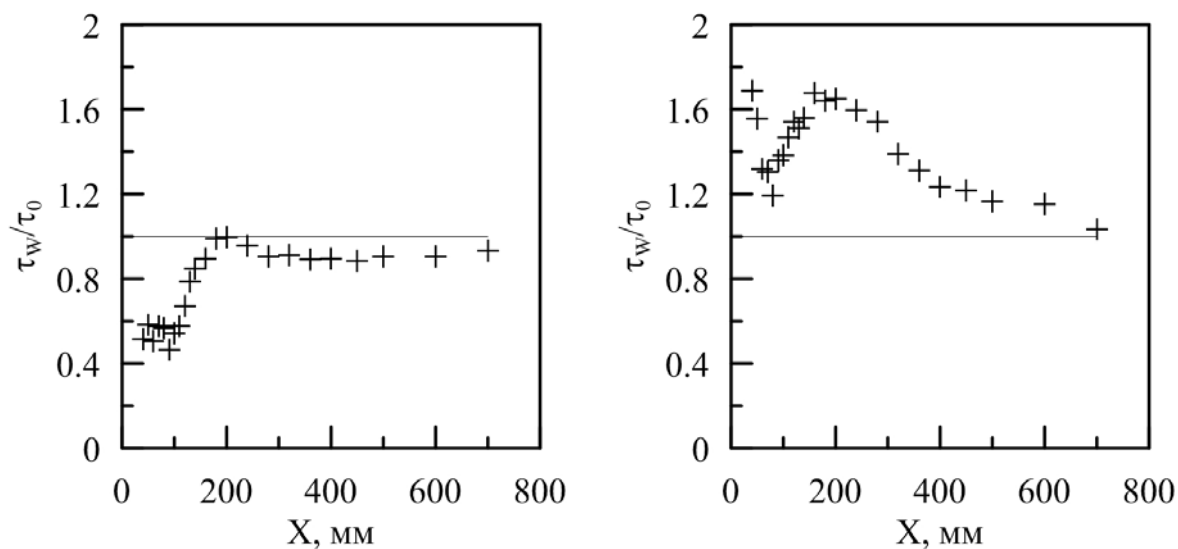


Рисунок 5. Трение на стенке в плоскости симметрии: а - линия А; б – линия Б

области течения после заслонки наблюдается резкое снижение трения по сравнению с невозмущенным течением. Трение выходит на постоянное значение при расстоянии от преграды около 200 мм. На противоположной стороне внутренней трубы, как следует из графика, представленного на рисунке 5 б, наблюдается существенный рост трения до значения координаты X примерно 200 мм, затем происходит плавное снижение до невозмущенного значения. Такое распределение напряжения трения на стенке вызвано перестроением течения за заслонкой. Увеличение расхода жидкости в незатененной части течения приводит к увеличению скорости жидкости, что в свою очередь приводит к увеличению напряжения трения на стенке трубы вдоль линии Б. В затененной области потока находится застойная зона, где скорость жидкости невелика, что приводит к снижению напряжения трения на стенке.

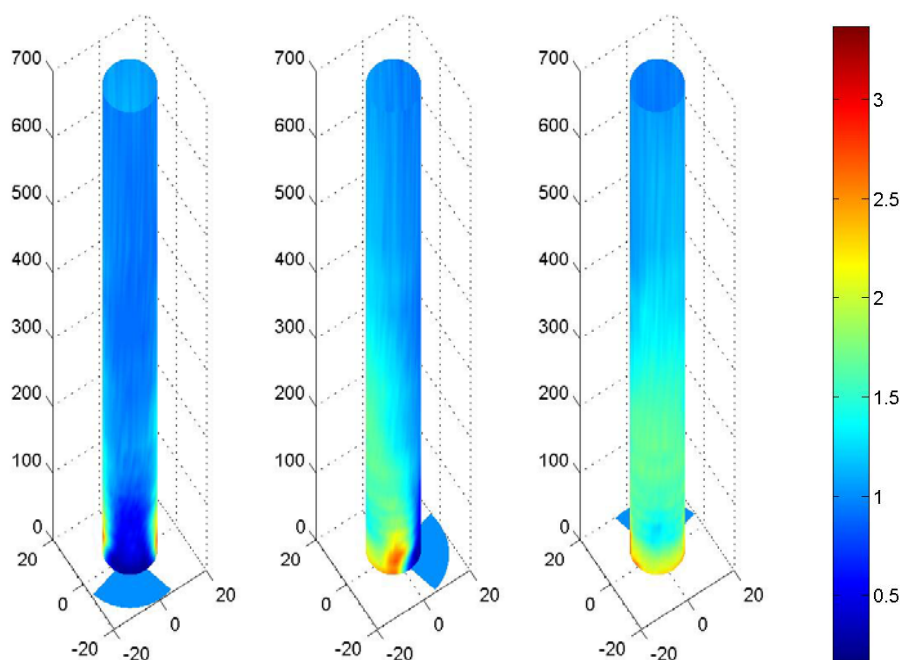


Рисунок 6. Распределение относительного напряжения трения на стенке на поверхности внутренней трубы канала.

Распределение относительного напряжения трения на стенке на поверхности внутренней трубы канала приведено на рисунке 6. По вертикальной координате показано расстояние от заслонки в миллиметрах, заслонка обозначена в виде синего сегмента внизу рисунка. Направление течения жидкости снизу вверх. Приведены три вида: заслонка направлена к наблюдателю, заслонка повернута на 90° и заслонка расположена на противоположной от наблюдателя стороне трубы. Цветовая шкала соответствует отношению измеренного напряжения трения на стенке к напряжению трения на стенке в кольцевом канале со свободным проходным сечением. На небольшом расстоянии от заслонки наблюдается сильное возмущение потока заслонкой. Оно выражается в существенном снижении напряжения трения на стенке в затененной области и повышении напряжения трения на стенке в области, соответствующей свободному проходному сечению канала. С увеличением расстояния от заслонки поле трения выравнивается, однако равномерного распределения напряжения трения на стенке не наблюдается даже на расстоянии 700 мм от заслонки.

Заключение.

Проведено исследование локальных осредненных и пульсационных характеристик течения жидкости, имеющего трехмерную структуру. Получены азимутальные распределения напряжения трения и его пульсаций на различном расстоянии от перегородки. Показано, что в непосредственной близости от перегородки наблюдается сложная структура сигнала датчиков трения, содержащая выраженный минимум в затененной области сечения канала и два максимума, расположенных по краям этой зоны. При увеличении расстояния от перегородки наблюдается выравнивание сигнала датчика, однако слабое влияние перегородки заметно на расстоянии свыше 600 мм.

Распределение турбулентных пульсаций напряжения трения на стенке трубы непосредственно за перегородкой характеризуется резким возрастанием в затененной области и небольшим снижением в свободном сечении канала. На расстоянии более 400 мм от перегородки измеренные значения интенсивности турбулентных пульсаций потока соответствуют таковым при турбулентном течении невозмущенной жидкости.

Список литературы

1. О.В. Митрофанова. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: Физматлит, 2010, 288 с.
2. И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев, В.М. Молочников. Теплообмен в турбулентной отрывной области при наложенных пульсациях потока. Теплофизика и аэромеханика, 2008, № 2, т. 15, с. 229–236
3. Armaly B.F., Durst F., Pereira J.C.F., Schonung B. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step. J. Fluid Mech., 1983, v. 127, p. 473-496.
4. Berbee J.G., Ellzey J.L. The effect of aspect ratio on the flow over a rearward-facing step. Exp. Fluids, 1989, v. 7, 447-452.
5. Papadopoulos G., Otugen M.V. Separation and reattaching flow structure in a suddenly expanding rectangular duct. J. Fluids Eng. 1995, v. 117, p. 17-23.
6. Adams E. W., Johnson J.P. Effects of the separating shear layer on the reattaching flow structure. Exp. Fluids, 1988, v. 6, p. 400-408.