

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА УСТУПОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПАССИВНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

В. И. Терехов, Я. И. Смутьский, К. А. Шаров

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: terekhov@itp.nsc.ru, smul@ngs.ru, sharov@itp.nsc.ru

С использованием метода трассерной визуализации проведено экспериментальное исследование течения в канале с обратным уступом и установленным перед ним ребром, генерирующим возмущения потока. Показано, что установка одиночного ребра приводит к деформации профилей продольных средних скоростей и турбулентных пульсаций. Выявлено влияние положения и высоты одиночного ребра на область рециркуляции за обратным уступом. Подтверждено, что при присоединении потока до уступа размер области рециркуляции за обратным уступом уменьшается.

Ключевые слова: турбулентный поток, отрывное течение, обратный уступ, пассивное возмущение, ребро.

DOI: 10.15372/PMTF20160120

**Введение.** В теплообменных устройствах часто используются каналы с резким расширением. Исследованию влияния расширения канала на структуру течения и координату присоединения пограничного слоя посвящено большое количество работ, в частности [1]. Важным вопросом является возможность управления отрывным течением. Существуют активные и пассивные методы влияния на отрыв потока за обратным уступом. В первом случае отрывной поток подвергается воздействию периодических возмущений, вносимых в основное течение либо в его пристенную часть с помощью электромеханических или аэродинамических (струйных) генераторов [2–4]. Контроль области отрыва с помощью вдува-отсоса непосредственно за уступом осуществляется в работах [5, 6]. Использование активных методов позволяет регулировать интенсивность и размеры циркуляционного течения после отрыва, однако реализация этих методов затруднена. Поэтому использование пассивных методов управления более предпочтительно в силу их простоты. Наличие дополнительных интенсифицирующих элементов (поперечных ребер, зубцов, генераторов вихрей различной формы), имеющих существенно меньшие по сравнению с основным отрывным потоком размеры, может приводить к значительной перестройке течения как с уменьшением, так и с увеличением рециркуляционной зоны. Авторы работы [7] за счет установки стержня на расстоянии, равном 2,5 высотам уступа до резкого расширения, уменьшили размер области рециркуляции за уступом на 10 % при низкой степени турбулентности. При высокой степени турбулентности данный эффект уменьшается. В работе [8] установка над уступом небольших прямоугольных пластин (табов) при определенных высоте, ши-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-09-00402).

© Терехов В. И., Смутьский Я. И., Шаров К. А., 2016

рине и расстоянии между пластинами позволила уменьшить рециркуляционную область более чем на 50 %.

В работе [9] экспериментально изучался процесс взаимодействия двух отрывных потоков различных размеров. Поток большего размера формировался в результате отрывного обтекания уступа, второй поток, меньшего размера, был образован при отрыве течения от тонкой поперечной пластины (ребра) различной высоты. Установлено, что в зависимости от соотношения размеров уступа и ребра точка присоединения потока может как смещаться к основанию уступа, так и удаляться от него.

Численные исследования [10, 11] процесса интерференции отрывных потоков различных размеров подтвердили экспериментальные данные [9], показав возможность уменьшения протяженности области отрыва за счет установки мини-турбулизатора. При этом одной из основных трудностей использования пассивных методов управления является необходимость точного прогнозирования процесса взаимодействия отрывных потоков различного размера. Следует отметить, что механизм формирования отрывных потоков за одиночными преградами изучен достаточно хорошо [12, 13], в отличие от течений, управляемых с помощью мини-турбулизаторов и одиночных преград.

В настоящей работе продолжается экспериментальное исследование явления интерференции турбулентных отрывных течений [14], рассматривается влияние расположения ребра, а также его высоты на поле осредненного течения, интенсивности турбулентных пульсаций и размеры рециркуляционной зоны за обратным уступом.

**Экспериментальная установка.** Эксперименты проводились в рабочем канале длиной 1 м из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм с прямоугольным сечением  $21 \times 150$  мм (рис. 1). На расстоянии 600 мм от входа в канал находился обратный уступ с постоянной высотой  $H = 9$  мм. Высота ребра  $\Delta$  составляла 3 и 6 мм, толщина в обоих случаях была равной  $e = 3$  мм, расстояние от ребра до обратного уступа  $S$  варьировалось в диапазоне  $3 \div 80$  мм. Число Рейнольдса, рассчитанное по высоте уступа  $H$  и среднерасходной скорости 25 м/с, не менялось и было равно  $Re_H = 15\,500$ . Средняя температура потока составляла  $20 \pm 1$  °С. На расстоянии от входа, равном 25 калибрам, течение было стационарным, его профиль скорости был близок к степенному с показателем степени  $n \approx 1/7$ .

Для измерения полей скоростей использовался метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Комплекс аппаратуры PIV-метода включал импульсный лазер, дающий парную вспышку и синхронизированный с цифровой камерой для измерения двумерного поля скорости. Интервал времени между вспышками лазера составлял 20 мкс, их длительность — 5 нс. Комплекс снабжен программным обеспечением, позволяющим определять как осредненные характеристики течения, так и статистические моменты второго и более высокого порядков. Для засева воздушного потока трассерами использовался генератор тумана Safex с рабочей жидкостью Fog Fluid Standard. Средний диаметр частиц трассеров

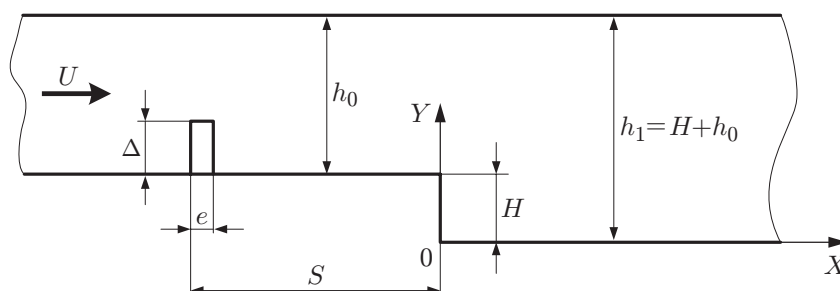


Рис. 1. Схема рабочего участка канала

приблизительно равен 1,0 мкм. С целью увеличения пространственного разрешения измерительная область делилась на участки размером  $30 \times 40$  мм, для каждого из которых было получено 4000 парных мгновенных снимков. Измерительная область изображения размером  $1360 \times 1025$  пикселей делилась на расчетные области размером  $64 \times 64$  пикселей. Расчет полей скоростей проводился с использованием итеративного кросс-корреляционного алгоритма, при этом степень перекрытия расчетных областей составляла 50 %. Затем проводилась фильтрация векторов скорости двумя способами: по отношению сигнал-шум и с помощью медианного фильтра.

Измерения проводились в миделевом сечении, в котором согласно [15] течение можно считать квазидвумерным, о чем свидетельствуют также результаты серии экспериментов по измерению параметров течения в различных сечениях по ширине канала.

**Результаты экспериментов.** Экспериментально исследовалось течение за обратным уступом при отсутствии дополнительного турбулизатора. Полученные профили средних скоростей и пульсаций вдоль канала за уступом качественно и количественно близки к данным [16], что свидетельствует о достоверности результатов. Некоторые различия объясняются различной геометрией канала (в настоящей работе расширение  $h_1/h_0 = 1,43$ , в работе [16]  $h_1/h_0 = 1,5$ ).

На рис. 2 показаны поля векторов скорости в центральном сечении канала при отсутствии возмущения перед областью отрыва потока (см. рис. 2,а) и при наличии ребра высотой  $\Delta = 3$  мм, расположенного на расстоянии  $S/\Delta = 13,3$  от кромки уступа (см. рис. 2,б). Имеются два важных различия в структуре отрывных потоков: для отрывного течения с дополнительным возмущением характерно увеличение толщины слоя смешения и приближение его к стенке. Границей слоя смешения на рис. 2 можно считать координату, в которой продольная скорость меняет знак на противоположный. При наличии возмущений (см. рис. 2,б) размеры области отрыва значительно уменьшаются по сравнению со случаем течения без ребра (см. рис. 2,а), также практически отсутствует вторичный угловой вихрь. Такое поведение характеристик слоя смешения наблюдалось в экспериментах [4] при введении в поток искусственных периодических возмущений, а также при турбулизации основного течения [12].

При наличии возмущений перед областью отрыва потока имеет место деформация входного профиля (рис. 3). Поток сужается, и заполненность профиля определяется положением точки присоединения течения позади ребра. Так, при  $S/\Delta > 13,3$  присоединение

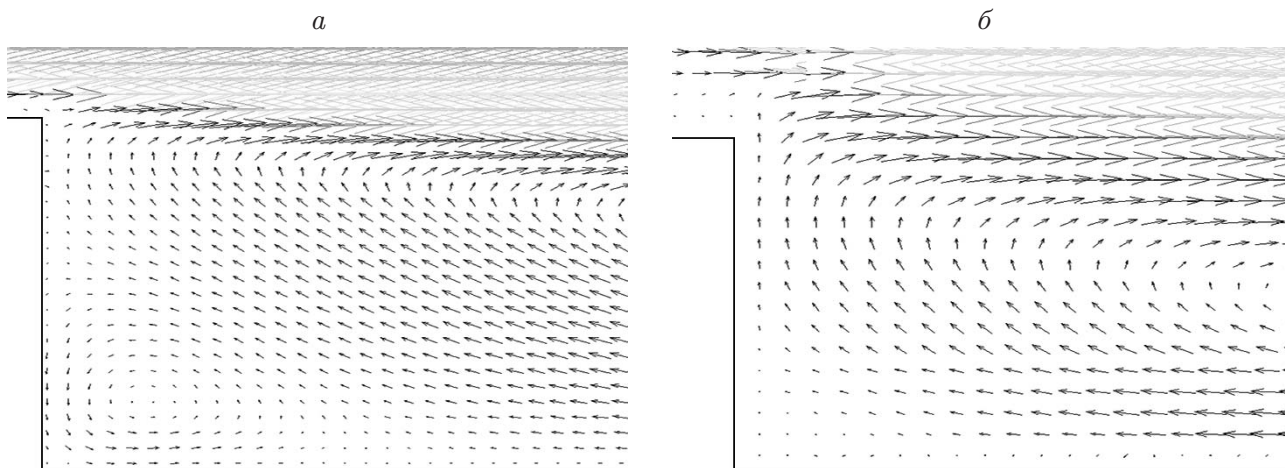


Рис. 2. Поля отрывного течения за уступом при отсутствии (а) и наличии (б) возмущения (ребра) ( $\Delta = 3$  мм,  $S/\Delta = 13,3$ )

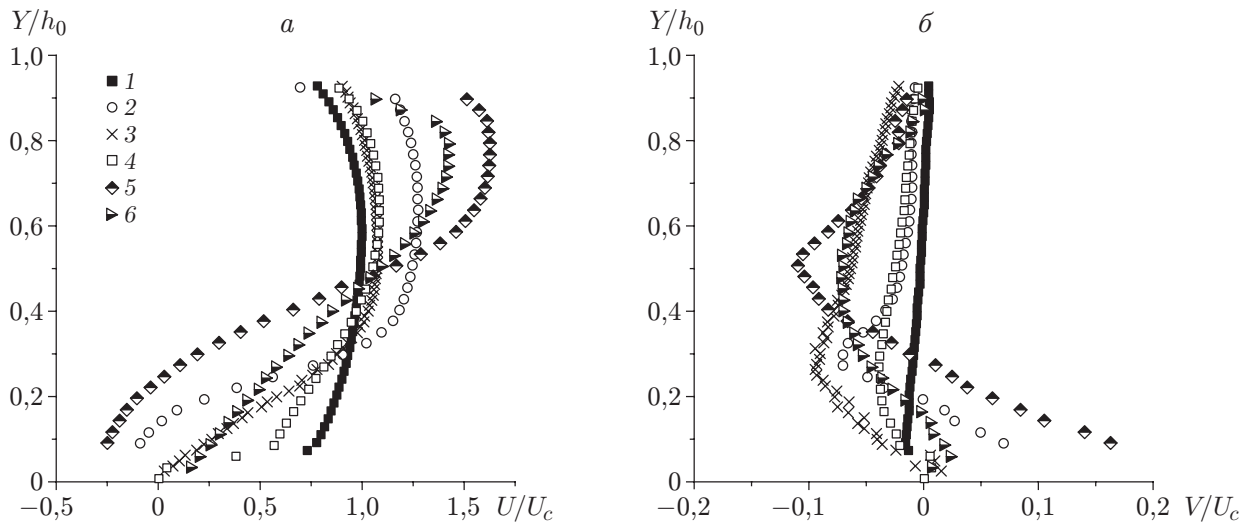


Рис. 3. Профили продольной (*a*) и поперечной (*б*) средних скоростей в сечении  $X/H = 0$  при различных значениях высоты ребра и расстояния от него до обратного уступа:

1 — гладкий уступ, 2 —  $\Delta = 3$  мм,  $S = 20$  мм, 3 —  $\Delta = 3$  мм,  $S = 40$  мм, 4 —  $\Delta = 6$  мм,  $S = 40$  мм, 5 —  $\Delta = 6$  мм,  $S = 80$  мм

потока происходило перед обратным уступом, при  $S/\Delta < 13,3$  присоединения потока не происходило и наблюдалось возвратное течение (см. рис. 3, *a*) и перетекание газа из области рециркуляции за уступом вверх по потоку (см. рис. 3, *б*). Максимальная скорость поперечного возвратного течения достигает  $0,08U_c$  ( $U_c$  — максимальная скорость над гладким уступом) при высоте ребра  $\Delta = 3$  мм и  $0,16U_c$  при  $\Delta = 6$  мм.

В канале за ребром развивается еще одна область рециркуляции, размер которой составляет приблизительно 11 высот преграды. Эта область оказывает значительное влияние на структуру течения после резкого расширения за уступом. При наличии преграды, установленной перед уступом, поток отдалится от стенки. Во всех рассматриваемых случаях влияние преграды существенно. Течение не восстанавливается даже при расположении ребра на больших расстояниях от уступа ( $S/\Delta = 20$ ).

Распределение средней продольной скорости на различных расстояниях от уступа приведено на рис. 4. Масштаб продольной средней скорости показан в верхней правой части рисунка. Как и в работе [16], в течении без возмущения отрицательное значение продольной компоненты скорости имеет место при  $X/H = 2 \div 5$ . При внесении возмущения данное значение зависит от области ввода этого возмущения, в частности при  $S/\Delta > 13,3$   $X/H = 1 \div 3$ . При  $S/\Delta < 13,3$  на значение  $X/H$  оказывает влияние высота преграды. В работе [16] замечено, что максимальная возвратная скорость за уступом не превышает  $0,2U_c$ , для преграды высотой  $\Delta = 3$  мм при  $S/\Delta > 13,3$  эта величина не превышает  $0,1U_c$ , при  $S/\Delta < 13,3$  ( $S/\Delta = 1$ ) достигает значения  $0,4U_c$ . Аналогичная ситуация имеет место в случае ребра высотой  $\Delta = 6$  мм, однако скорость возвратного течения при этом увеличивается.

В случае когда ребро расположено непосредственно на кромке уступа ( $S/\Delta = 1$ ), размер вторичного вихря увеличивается и становится сопоставимым с размером вторичного вихря в течении с классическим обратным уступом, а основной вихрь имеет максимальный размер. При увеличении расстояния до уступа основной вихрь уменьшается и при  $S = 60$  мм имеет минимальный размер. Например, в первом сечении для случая  $S/\Delta < 13,3$  линия  $U/U_c = 0$  смещается на расстояние, равное  $0,2$  высоты канала.

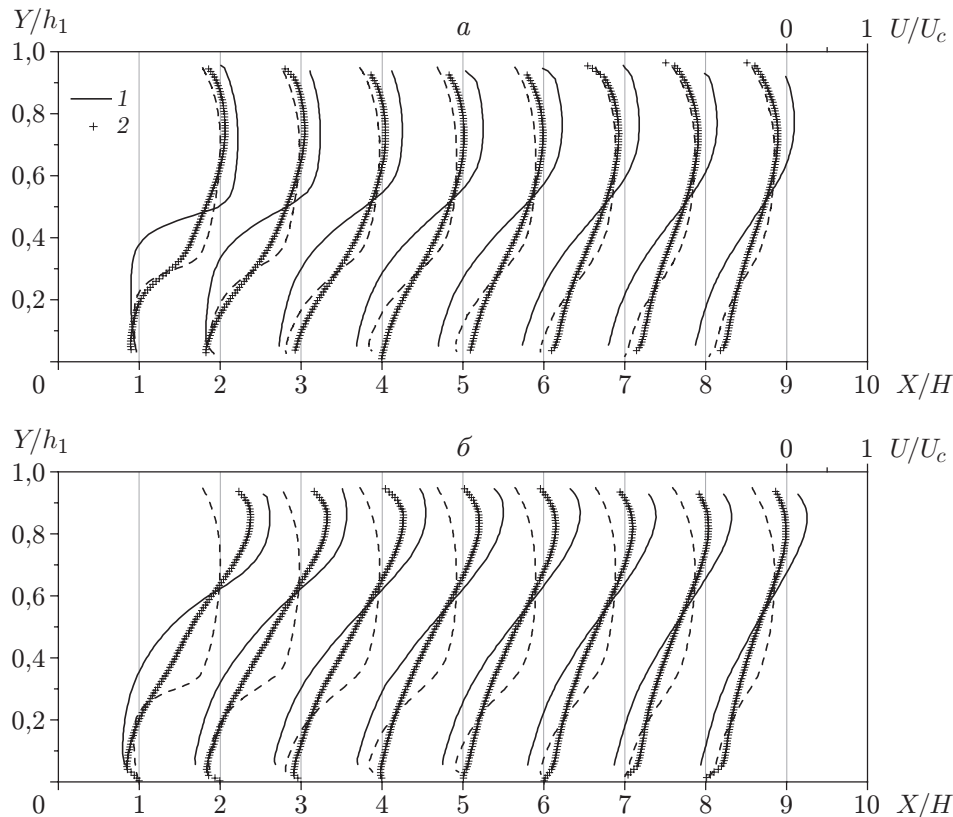


Рис. 4. Профили продольной средней скорости при различных значениях высоты ребра и расстояния от него до обратного уступа:

*a* — при наличии ребра высотой  $\Delta = 3$  мм (1 —  $S = 3$  мм, 2 —  $S = 60$  мм), *б* — при наличии ребра высотой  $\Delta = 6$  мм (1 —  $S = 40$  мм, 2 —  $S = 80$  мм); штриховые линии — при отсутствии ребра; тонкие вертикальные линии —  $U/U_c = 0$

Формирующийся за ребром слой смешения оказывает влияние на течение за уступом, изменяя его по сравнению со случаем уступа без возмущения. Следует отметить общую тенденцию для слоя смешения, данные о толщине которого приведены на рис. 5, где  $\delta = Y_{0,9U_{\max}} - Y_{0,1U_{\max}}$  — характерная толщина слоя смешения, определяемая координатами, в которых скорость составляет 0,1 и 0,9 максимального значения. В случае течения за классическим уступом толщина слоя смешения практически не меняется ( $\delta/h_1 = 0,21$ ), для течения за уступом при наличии ребра характерно увеличение толщины слоя смешения, причем по мере удаления преграды от уступа скорость увеличения толщины слоя смешения уменьшается. На начальном участке при  $S/\Delta > 13$  толщина слоя смешения больше, так как на формирование такого слоя за уступом оказывает влияние слой смешения, образующийся при отрыве от ребра.

На рис. 6 показано влияние расстояния  $S$  между ребром и обратным уступом на профили пульсаций продольной средней скорости. Масштаб среднеквадратичных пульсаций продольной скорости показан в верхней правой части рисунка. Увеличение расстояния от ребра до уступа приводит к сглаживанию профиля пульсаций на начальных этапах и более быстрому их затуханию вниз по течению. Следует отметить, что при  $S/\Delta = 13,3; 20,0$  на расстоянии более двух калибров профили пульсаций становятся подобными. Это обусловлено тем, что на больших расстояниях крупные турбулентные структуры, возникающие при наличии ребра, диффундируют по высоте канала. Для конфигураций с  $S/\Delta = 1,00$ ;

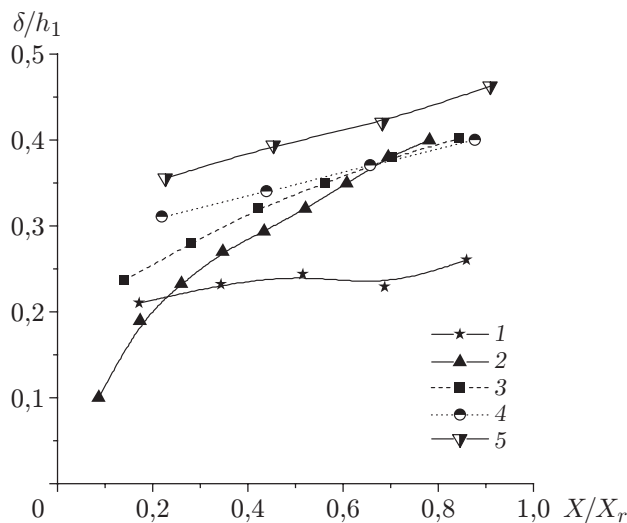


Рис. 5. Зависимость толщины слоя смешения от положения мини-преграды при отсутствии (1) и при наличии (2–5) ребра высотой  $\Delta = 3$  мм: 2 —  $S = 3$  мм, 3 —  $S = 20$  мм, 4 —  $S = 40$  мм, 5 —  $S = 60$  мм

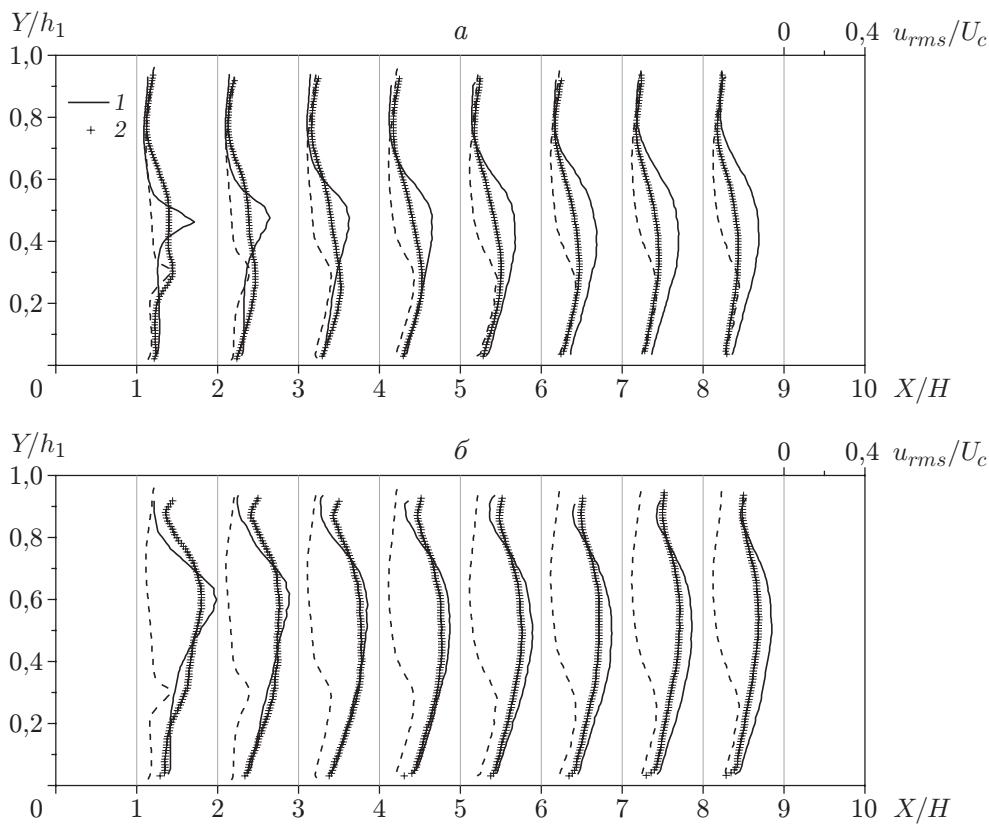


Рис. 6. Профили среднеквадратичных пульсаций продольной скорости при различных значениях высоты ребра и расстояния от него до обратного уступа: *a* — при наличии ребра высотой  $\Delta = 3$  мм (1 —  $S = 3$  мм, 2 —  $S = 60$  мм), *б* — при наличии ребра высотой  $\Delta = 6$  мм (1 —  $S = 40$  мм, 2 —  $S = 80$  мм); штриховые линии — при отсутствии ребра; тонкие вертикальные линии —  $u_{rms}/U_c = 0$

6,67 присоединения оторвавшегося пограничного слоя до уступа не происходит и образовавшиеся на кромке ребра турбулентные структуры не успевают “размыться”. Следует отметить, что независимо от места расположения ребра характерным является увеличение степени турбулентности вблизи точки присоединения. На рис. 6 также видно, что при больших расстояниях от ребра до кромки уступа максимальная степень турбулентности достигается на расстоянии, равном девяти калибрам, а по мере приближения ребра к кромке максимум достигается на расстоянии, равном трем-четырем калибрам.

Распределения пульсаций продольной скорости для ребра высотой 6 мм приведены на рис. 6,б. Результаты визуализации течения показывают, что увеличение высоты ребра приводит к интенсификации крупномасштабных турбулентных вихрей. Для конфигурации с  $S = 40$  мм, в которой пограничный слой не присоединился в узкой части канала, характерна повышенная степень турбулентности. На рис. 6,б видно, что в этом случае диссипация крупномасштабных турбулентных структур происходит с некоторым запаздыванием по сравнению со случаем, когда ребро расположено на расстоянии  $S = 88$  мм. Заметим также, что при увеличении высоты преграды до  $\Delta = 6$  мм максимальное значение степени турбулентности смещается приблизительно на ту же величину от стенки.

Из рис. 6 следует еще один важный вывод. Релаксация возмущений в результате интерференции отрывных потоков (для конфигураций, в которых присоединение потока осуществляется до уступа) происходит на достаточно больших расстояниях от точки отрыва. При этом наиболее медленно вырождаются турбулентные пульсации. На рис. 6 видно, что различия распределений пульсаций имеют место на всех исследованных расстояниях от уступа, тогда как на средние скорости (см. рис. 4) начальные возмущения при  $X/H > 8$  практически не оказывают влияния.

Одной из наиболее важных характеристик отрывного течения является координата точки присоединения потока  $X_r$ , в которой касательное напряжение на стенке обращается в нуль ( $C_f \rightarrow 0$ ). В настоящей работе величина  $X_r$  оценивалась по координате точки, в которой происходит изменение знака продольной скорости в пристенной области течения.

На рис. 7 приведены полученные в различных работах зависимости длины области рециркуляции от высоты ребра и расстояния  $S$ . В работе [9] экспериментально изучалось

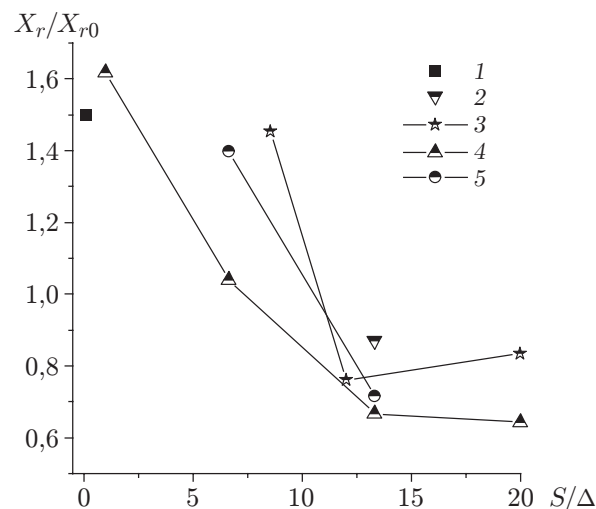


Рис. 7. Зависимость длины области рециркуляции  $X_r$  от высоты ребра  $\Delta$  и расстояния  $S$  при различных значениях  $\Delta/H$ :

1 —  $\Delta/H = 0,2$  [8], 2 —  $\Delta/H = 0,3$  [10], 3 —  $\Delta/H = 4$  [9], 4, 5 — данные настоящей работы (4 —  $\Delta/H = 1/3$ , 5 —  $\Delta/H = 2/3$ )

влияние высоты ребра  $\Delta/H$  на относительное расстояние от основания уступа до точки присоединения потока  $X_r/X_{r0}$ , где  $X_{r0}$  — координата точки присоединения для невозмущенного течения. Согласно [9] над уступом формировался пограничный слой с толщиной потери импульса, сопоставимой с высотой уступа, при  $Re_H = 10^4$ . Отношение высоты уступа к ширине канала равно 10, ребро располагалось перед уступом на расстоянии  $S/\Delta = 13$ , т. е. условия в работе [9] были близкими к условиям настоящего исследования. Обтекание уступа безградиентным потоком при  $Re_H = 3000$  численно исследовалось в [10]. Данные работы [8] приведены на рис. 7 для  $S/\Delta = 1$ ,  $Re_H = 2,4 \cdot 10^4$ . Различие с результатами экспериментов, полученными в настоящей работе, объясняется тем, что в работе [9] высота ребра  $\Delta = 0,2H$ , расширение канала  $h_1/h_0 = 1,12$ , в настоящей работе  $\Delta = 0,33H$ ,  $h_1/h_0 = 1,43$ .

Из рис. 7 следует, что по мере увеличения расстояния от ребра до уступа размер области рециркуляции  $X_r$  уменьшается, как и в работе [12], в которой повышение уровня турбулентности потока также приводит к уменьшению  $X_r$ . Это обусловлено интенсификацией вихревого следа за преградой. Согласно [9] при  $\Delta/H \approx 0,33$  присоединение потока за ребром происходит вблизи уступа. При дальнейшем увеличении высоты преграды ( $\Delta/H > 0,33$ ) поток не успевает присоединиться к стенке канала и попадает в область за уступом, при этом значительно увеличивается протяженность области рециркуляции (на 50 % при  $\Delta/H = 0,5$ ).

**Заключение.** С использованием PIV-метода проведены исследования течения за обратным уступом при наличии мини-преграды перед ним для числа Рейнольдса  $Re_H = 15\,500$ . Исследовано влияние положения преграды перед уступом на процесс интерференции отрывных потоков, имеющих различные размеры. В предельном случае, когда преграда расположена на краю уступа ( $S/\Delta = 1$ ), параметр  $X_r$  увеличивается на 60 % по сравнению со случаем классического уступа; при  $S/\Delta > 13,3$  размер области рециркуляции уменьшается приблизительно на 40 %, что обусловлено присоединением потока перед уступом, когда средняя поперечная скорость является отрицательной и поток не успевает восстановиться. Наличие за ребром присоединенного слоя смешения до резкого расширения приводит к уменьшению области рециркуляции за уступом.

Авторы выражают благодарность Н. И. Ярыгиной за полезные обсуждения работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Eaton J. K., Johnston J. P.** A review of research on subsonic turbulent flow reattachment // AIAA J. 1981. V. 19. P. 1093–1100.
2. **Chun K. B., Sung H. J.** Visualization of a locally-forced separated flow over a backward-facing step // Exp. Fluids. 1998. V. 25. P. 133–142.
3. **Saric S., Jakirlic S., Tropea C.** A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: An example // J. Fluids Engng. 2005. V. 127. P. 879–887.
4. **Давлетшин И. А., Михеев Н. И., Молочников В. М.** Отрыв пульсирующего потока // Докл. АН. 2007. Т. 417. С. 760–763.
5. **Sano M., Suzuki I., Sakuraba K.** Control of turbulent channel flow over a backward-facing step by suction // J. Fluid Sci. Technol. 2009. V. 4, N 1. P. 188–199.
6. **Батенко С. В., Терехов В. И.** Трение и теплообмен в ламинарном отрывном потоке за прямоугольным уступом при наличии пористого вдува или отсоса // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 1. С. 18–28.
7. **Isomoto K., Honami S.** The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment process over a backward-facing step // Trans. ASME. J. Fluids Engng. 1989. V. 111. P. 87–92.



8. **Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J. Y.** Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // *Phys. Fluids*. 2007. V. 19. 105103.
9. **Miau J. J., Lee K. C., Chen M. H., Chou J. H.** Control of separated flow by a two-dimensional scillating fence // *AIAA J.* 1991. V. 29. P. 1140–1148.
10. **Neumann J., Wengle H.** DNS and LES of passively controlled backward-facing step flow // *Flow, Turbulence Combust.* 2003. V. 71. P. 297–310.
11. **Neumann J.** On time-dependent behaviour of controlled turbulent flow with separation and reattachment // *Proc. Appl. Math. Mech.* 2003. N 3. P. 44–47.
12. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2003. V. 46. P. 4535–4551.
13. **Ota T.** A survey of heat transfer in separated and reattached flows // *Appl. Mech. Rev.* 2000. V. 53. P. 219–235.
14. **Терехов В. И., Смульский Я. И., Шаров К. А.** Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления // *Письма в ЖТФ.* 2012. № 3. С. 46–53.
15. **Tylli N., Kaiktsis L., Ineichen B.** Sidewall effects in flow over a backward-facing step: Experiments and numerical simulations // *Phys. Fluids.* 2002. V. 14, N 11. P. 3835–3845.
16. **Kasagi N., Matsunaga A.** Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow // *Intern. J. Heat Fluid Flow.* 1995. V. 16. P. 477–485.

*Поступила в редакцию 7/IV 2014 г.,  
в окончательном варианте — 30/IX 2014 г.*

---