

03

## **Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления**

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

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования методом цифровой трассерной визуализации взаимодействия турбулентных отрывных потоков за прямым обратным уступом при наличии минитурбулизатора. Показано, что установка преграды перед уступом приводит к деформации профилей скорости и турбулентных пульсаций, а также значительному изменению длины рециркуляционной зоны.

Разработка эффективных методов управления характеристиками турбулентных отрывных течений представляет собой одну из фундаментальных проблем аэродинамики и теплопереноса. Особый интерес к этой задаче диктуется важными практическими приложениями для нужд энергетики, химической технологии и охлаждения электроники. Существует два метода управления отрыва потока — активный и пассивный. В первом случае на отрывной поток воздействуют периодическими возмущениями, наложенными на основное течение либо на его пристеночную часть с помощью электромеханических или аэродинамических (струйных) генераторов [1–4]. Данный метод позволяет плавно регулировать интенсивность и размеры циркуляционного течения после отрыва, однако практическая его реализация весьма затруднительна. В этом отношении пассивные методы управления являются более предпочтительными в силу своей простоты. Дополнительные интенсифицирующие элементы (поперечные ребра, зубцы, вихрегенераторы различной формы), несмотря на существенно меньшие масштабы по сравнению с основным отрывным потоком, могут приводить к значительной перестройке течения [5–10] как с сокращением, так и с расширением циркуляционной зоны. При этом одной из основных трудностей

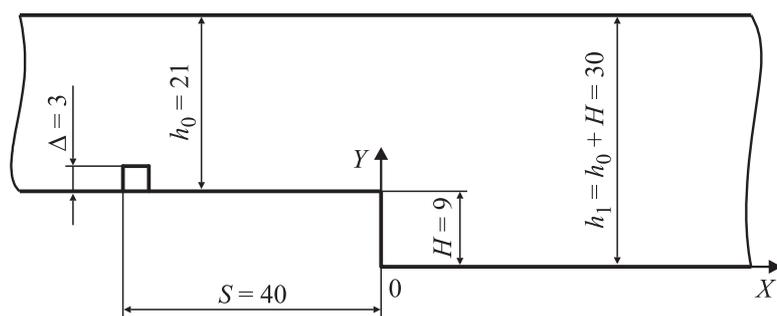


Рис. 1. Схема рабочего участка канала. Все размеры указаны в мм.

использования пассивных методов управления является необходимость точного прогнозирования сложного процесса интерференции отрывных потоков с различными масштабами. Следует отметить, что если механизм формирования отрывных потоков за одиночными преградами изучен основательно [11–13], то этого нельзя сказать об управляемых с помощью микстурбулизаторов течениях. В литературе имеется ограниченное число экспериментальных и численных исследований, результаты которых носят противоречивый характер.

В данной работе представлены первые результаты экспериментального исследования аэродинамической структуры взаимодействия малых вихревых возмущений с отрывным потоком за прямым обратным уступом.

Для решения этой задачи был создан экспериментальный стенд, рабочий канал (рис. 1) которого имел прямоугольное сечение  $21 \times 150$  мм, длину 1 м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала. 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  $3 \times 3$  мм. Она располагалась на нижней стенке канала на различных расстояниях от точки отрыва потока. В данных экспериментах это расстояние было фиксированным  $S = 40$  мм, так что относительные

геометрические параметры были примерно такими же, как и в расчетных исследованиях [8,9].

Число Рейнольдса, построенное по высоте уступа и максимальной скорости  $U_c = 30$  м/с, было равно  $Re_H = 15000$ . Средняя температура потока была  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . На расстоянии 25 калибров от входа течение было стабилизированным с профилем скорости, близким к степенному с  $n = 1/7$ . Измеренные профили скорости и их пульсаций хорошо согласовывались с данными классической работы Conte–Bellot.

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  $20 \mu\text{s}$ , а их длительность  $5 \text{ ns}$ . 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 и их средним диаметром  $\sim 1.0 \mu\text{m}$ .

С целью увеличения пространственного разрешения вся измерительная область была поделена на участки. Размер участка составлял  $\sim 30 \times 40 \text{ mm}$ . Для каждого участка было получено по 4000 парных мгновенных снимков. Расчетное поле снимка  $1360 \times 1025$  пикселей делилось на ячейки размером  $64 \times 64$ . 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.

Сравнивая поля течения как при отсутствии возмущения перед отрывом потока, так и при наличии минипреграды, полученные с помощью лазерной визуализации, отметим два важных отличия в структуре отрывных потоков. Для отрывного течения с дополнительным возмущением характерным является расширение слоя смешения и приближение его к стенке. Его границей можно условно считать координату, где продольная скорость меняет знак на противоположный. Размеры отрывного пузыря при наличии возмущений заметно сокращаются по сравнению с течением без минитурбулизатора. Такое поведение характеристик слоя смешения наблюдалось в экспериментах [3] при

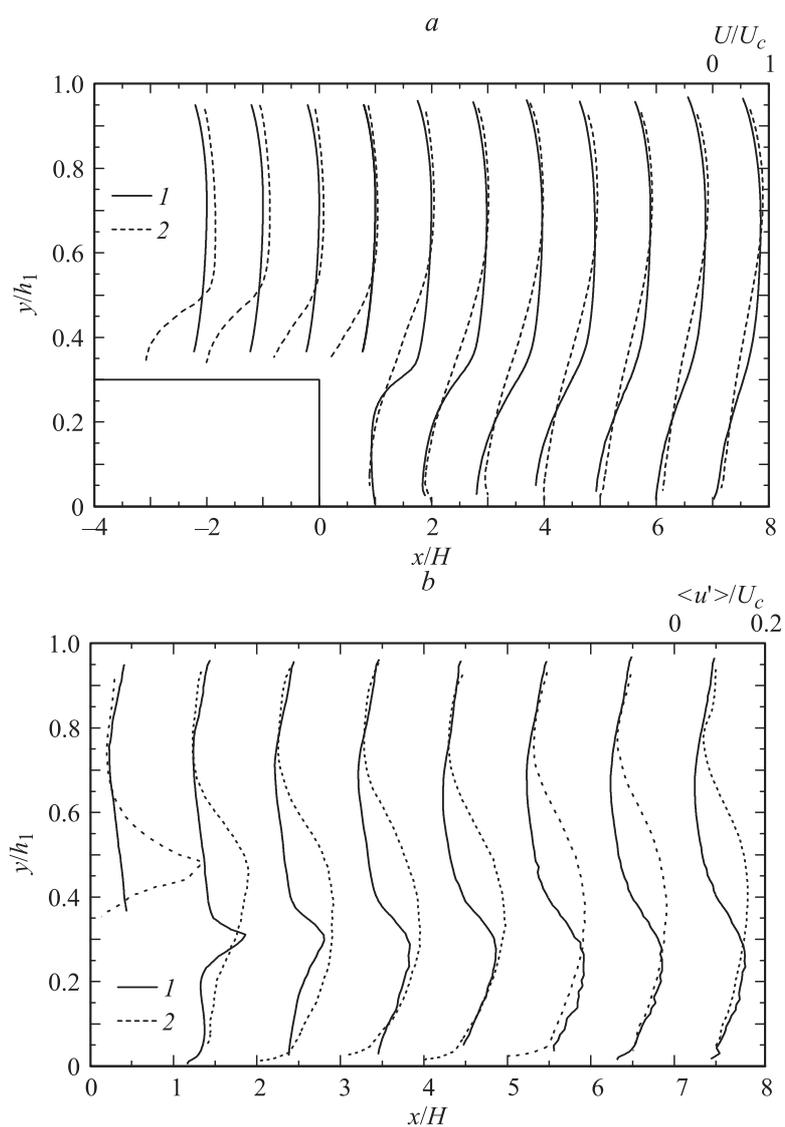
введении искусственных периодических возмущений в поток, а также при турбулизации основного течения [12].

Второй важной особенностью отрыва при наложенном пассивном возмущении является разрушение вторичного углового вихря у основания уступа. Если развитие отрыва происходит без дополнительного вихревого возмущения, то угловой вихрь четко просматривается, хотя интенсивность его невелика.

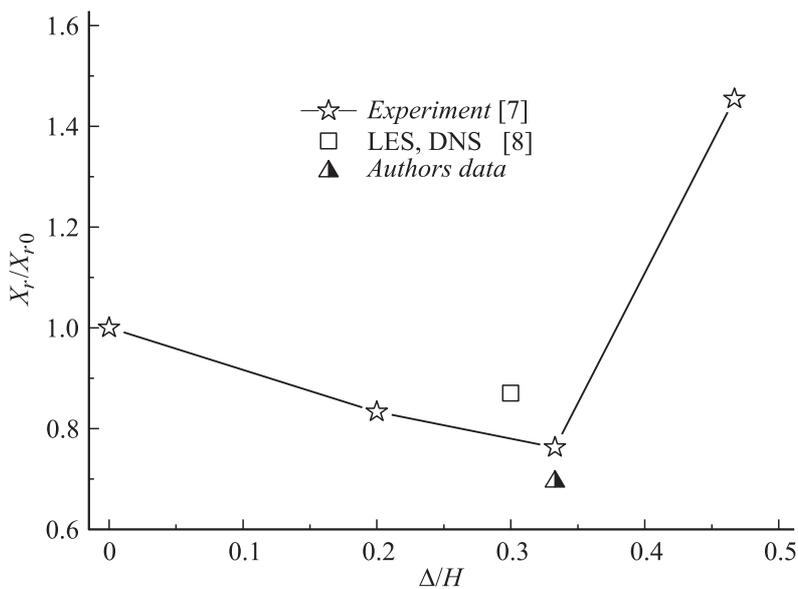
Отмеченные отличия в структуре течения отрыва при наличии возмущений подтверждаются и при сопоставлении опытных данных по профилям продольных скоростей и из среднеквадратичных пульсаций. Эти данные показаны на рис. 2. Распределение скорости за уступом в канале без минитурбулизатора качественно и количественно совпадает с опытными данными работы [14], что говорит в пользу достоверности полученных результатов. При наличии возмущений перед отрывом имеет место деформация водного профиля. В канале после минипреграды развивается своя рециркуляционная область  $\sim 9$  высот преграды, которая оказывает значительное влияние на структуру течения после внезапного расширения за уступом. Действительно, судя по данным рис. 2, *a*, в области смещения не наблюдается точка перегиба, которая характерна для конфигурации без минипреграды на расстоянии от стенки, примерно равном высоте уступа.

На рис. 2, *b* представлены изменения продольной среднеквадратичной скорости. На выходе из узкого канала с установленной минипреградой происходит усиление пульсаций скорости по сравнению с невозмущенным течением примерно в 3 раза. Высокий уровень турбулентности, рождаемый отрывом потока за минипреградой, оказывает влияние на всю область течения после внезапного расширения канала. Для обоих случаев характерно усиление степени турбулентности в области, близкой к точке присоединения. Так, из рис. 2, *b* видно, что максимальная турбулентность достигается на  $X/H \sim 5$  калибрах при отсутствии возмущений и при  $X/H \sim 3-4$  в канале с минитурбулизатором.

По данным рис. 2 можно сделать еще один важный вывод. Релаксация возмущений за счет интерференции отрывных потоков происходит на достаточно больших расстояниях от точки отрыва. При этом особенно медленно вырождаются турбулентные пульсации. Судя по рис. 2, *b*, отличие в распределениях пульсаций отчетливо наблюдается на всех исследованных удалениях от уступа, тогда как для средних скоростей



**Рис. 2.** Профили: *a* — средней продольной скорости; *b* — среднеквадратичной продольной скорости; линии: 1 — без преграды, 2 — с преградой перед уступом.



**Рис. 3.** Влияние высоты преграды  $\Delta/H$  на изменение длины зоны рециркуляции  $X_r$ .

(рис. 2, *a*) начальные возмущения практически перестают сказываться начиная с  $X/H > 8$ .

Одной из наиболее важных характеристик отрывного течения является координата точки присоединения потока  $X_r$ , где касательное напряжение на стенке обращается в ноль  $C_f \rightarrow 0$ . В данной работе величина  $X_r$  оценивалась по местоположению координаты точки, где происходит изменение знака продольной скорости в пристеночной области течения.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные [7] и расчетные исследования [8], а также результаты измерений авторов влияния высоты минипреграды  $\Delta/H$  на относительную длину от основания уступа до точки присоединения потока  $X_r/X_{r0}$ , где  $X_{r0}$  — координата точки присоединения для невозмущенного течения. При этом расстояние от минипреграды до точки отрыва было фиксированным и равным  $S/\Delta = 13.3$ . В работе [7] над уступом формировался пограничный слой с

толщиной вытеснения импульса, сопоставимой с высотой уступа, число  $Re_H = 10\,000$ , соотношение высоты уступа к высоте канала было 10. Обтекание уступа безградиентным потоком исследовалось в [8] для числа  $Re = 3000$ . Расстояние от минипреграды до точки отрыва в [7,8] было  $S/\Delta = 12$ , так что условия в работах [7,8] были близкими к данному исследованию.

Как следует из данных рис. 3, вначале, по мере увеличения высоты преграды длина  $X_r$  сокращается. Это вызвано интенсификацией вихревого следа за преградой по аналогии с результатами работ [10,12], когда повышение турбулентности потока также приводит к уменьшению  $X_r$ . При высоте минипреграды  $\Delta/H \leq 0.33$ , как показала визуализация течения [7], присоединение потока происходит до внезапного расширения. При дальнейшем увеличении высоты преграды  $\Delta/H > 0.33$  поток не успевает присоединиться к стенке канала и попадает в область за уступом, значительно увеличивая (до  $\sim 50\%$  при  $\Delta/H = 0.5$ ) протяженность рециркуляционной зоны. Как видно на рис. 3, результаты представленной работы качественно согласуются с экспериментами [7] и расчетом [8]. Одной из возможных причин количественного расхождения результатов указанных работ является отличие в геометрии канала, а также формы минипреграды. При этом сложный и многофакторный механизм интерференции отрывных потоков диктует необходимость проведения детальных исследований при вариации режимных и геометрических параметров в широких пределах.

Авторы выражают признательность Н.И. Ярыгиной за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 09-08-00076 и № 10-08-00105).

## Список литературы

- [1] *Chun S., Lee H., Sung H.J.* // Experiments in Fluids. 1999. V. 26. P. 437–440.
- [2] *Saric S., Jakilic S., Tropea C.* // J. Fluids Eng. 2005. V. 127. P. 879–887.
- [3] *Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М.* // ДАН. 2007. Т. 417. С. 760–763.

- [4] Honami S., Yamagata K., Motosuke M. // Proc. Int. Conf. on Jets, Wake and Separated Flows, ICJWSF. Berlin, 2008. 8 p.
- [5] Heeman A.F., Morisson J.F. // AIAA J. 1998. V. 36. P. 1014–1022.
- [6] Park H. Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y. // Physics of Fluids. 2007. V. 19. P. 105103.
- [7] Miao J.J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H. // AIAA J. 1991. P. 1140–1148.
- [8] Neumann J., Wengle H. // Flow, Turb. and Comb. 2008. V. 71. P. 297–310.
- [9] Neumann J., Wengle H. // J. Turbulence. 2004. V. 5. A. P. 022.
- [10] Bogatko T.V., D'yachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I. // Proc. of the 14th Int. Heat Transfer Conf. Washington, USA. Paper IHTC14-22153. 7 p.
- [11] Gad-el-Hak M. // Appl. Mech. Rev. 1996. V. 49. P. 365–379.
- [12] Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4535–4551.
- [13] Ota T. // Appl. Mech. Rev. 2000. V. 53. P. 219–235.
- [14] Kasagi N., Matsunaga A. // Int. J. Heat and Fluid Flow. 1995. V. 16. P. 477–485.