

УДК 536.24

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОТРЫВЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ЗА УСТУПОМ И РЕБРОМ.

### 1. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ

В. И. Терехов, Н. И. Ярыгина, Р. Ф. Жданов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано воздействие формы и размеров преграды на отрывное течение и теплообмен. Представлены результаты исследования и сравнительного анализа гидродинамической структуры отрывного потока за ребром и уступом. Показан принципиально различный характер переносных процессов в отрывном течении за данными препятствиями. Исследована структура течения во вторичной вихревой зоне.

**Введение.** В последнее время проблема интенсификации теплообменных процессов приобрела особую остроту в связи с решением задач энергосбережения в теплообменных установках. Один из ее аспектов — пассивная интенсификация конвективного теплообмена поверхности за счет отрыва потока. Например, во многих технических устройствах, таких как теплоэнергетическое оборудование, камеры сгорания, газовые турбины и т. п., интенсификация теплоотдачи достигается с помощью оребрения поверхности. Теплообмен в отрывных потоках исследован недостаточно. Мало изучена связь между вихреобразованием и теплоотдачей. Изучение структуры течения вблизи единичных препятствий позволяет выявить причины перестройки течения в отрывном потоке и связанные с ней изменения локальной теплоотдачи. Недостаточно исследованными остаются механизмы воздействия на тепловые характеристики предыстории потока и геометрических параметров, рассматриваемые в данной работе.

Обтекание обратного уступа представляет собой классическую геометрию отрывного течения, исследованию которого посвящено большое количество работ (см., например, [1–9]). Поэтому их результаты можно использовать для сравнения с отрывом, вызванным иными единичными преградами. В то же время известные работы по изучению отрывного течения, где в качестве преграды используется поперечная пластина — ребро (см., например, [10–12]), не столь многочисленны, и в них отсутствует сравнение с отрывом за уступом в идентичных условиях. В большинстве перечисленных работ в основном исследуются отдельные свойства и параметры отрыва при постоянной или изменяющейся в малом диапазоне относительной высоте препятствия. В данной работе используется комплексный подход [13, 14] к изучению характеристик отрывного течения при изменении формы и высоты преграды.

**Условия эксперимента.** Эксперименты проводились в аэродинамической трубе, представляющей собой разомкнутый воздушный контур с установленным на входе вентилятором и имеющей рабочий канал квадратного сечения  $200 \times 200$  мм и длиной 600 мм. Скорость потока над преградой составляла 20 м/с, что соответствует числу Рейнольдса,

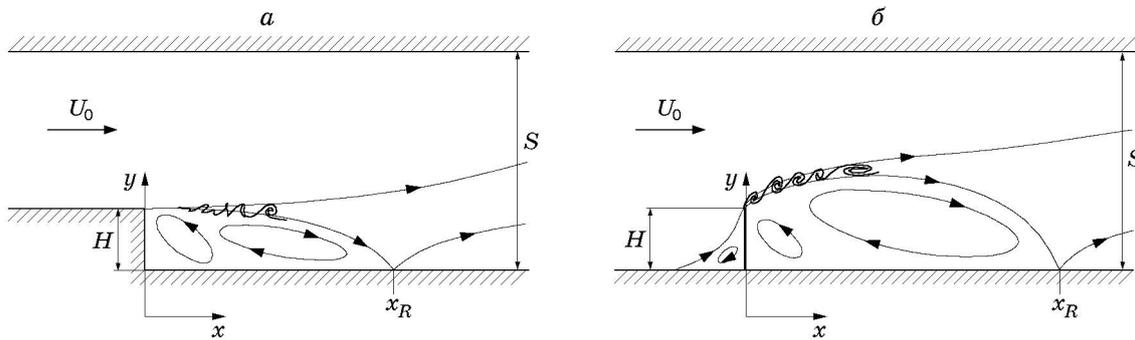


Рис. 1. Схема течения за обратным уступом (а) и ребром (б)

рассчитанному по высоте канала,  $Re_S \approx 3 \cdot 10^5$ . Уровень турбулентности в центральной области канала достигал 1,2 %. Динамические характеристики измерены при высоте уступа (препятствия)  $H = 10; 20$  мм.

В экспериментах применялись модели шириной 200 мм (рис. 1). Для сажемасляной визуализации отрывного течения на поверхности за преградами использовалась модель с верхней частью из оргстекла. Визуализирующий состав представлял собой смесь офсетной краски и керосина. Для изучения динамических потерь за ребром и уступом использовалась текстолитовая матрица, на поверхности которой вдоль оси симметрии пластины было сделано 44 отверстия диаметром примерно 0,3 мм для измерения статического давления. Измерения скорости возвратного течения проводились миниатюрной трубкой Пито — Прандтля с внешним диаметром насадка 0,4 мм.

При идентичных внешних условиях структура течения в ядре потока над ребром и уступом одной высоты приблизительно одинаковая, что позволило провести достоверный сравнительный анализ характеристик отрывного течения за данными препятствиями и выявить степень влияния рециркуляционного течения перед ребром на отрыв за ним.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 2, а, б представлены результаты сажемасляной визуализации поверхности за уступом и ребром соответственно (масштаб всех фотографий одинаковый, направление течения слева направо). Из рис. 2 следует, что условия присоединения оторвавшегося потока и формирования вторичной зоны с крупномасштабными вихрями за уступом и ребром различны. При отрыве за уступом зарождаются более мелкие, чем за ребром, вихревые структуры, образующие слой смешения [15]. Эти вихри сталкиваются с поверхностью, что приводит к возникновению области присоединения, осредненная граница которой как бы прилипает к боковым стенкам. За ребром этот эффект не наблюдается, что свидетельствует о крупных размерах вихреобразований в слое смешения. За уступом высотой 20 мм (кадр 1 на рис. 2, а) осредненная линия области присоединения потока расположена на расстоянии  $x_R/H \approx 4,8$  вдоль оси симметрии модели. Приближаясь к боковым стенкам канала, осредненная линия области присоединения деформируется, подходя к уступу на расстояние, приблизительно равное  $4,5H$ . Область присоединения неустойчива, поэтому ее ширина составляет примерно половину высоты уступа вверх и вниз по течению. Структура присоединившегося течения в направлении вторичного вихря деформируется еще до отрыва от поверхности. Вдоль оси симметрии модели место повторного отрыва удалено от уступа на расстояние, приближенно равное  $2H$ . Таким образом, размер области вторичного вихря в трансверсальном направлении составляет от 20 % (вблизи стенок) до 40 % размера отрывного пузыря. В центральной части зоны вторичного вихря отмечается грибообразная структура. При уменьшении высоты уступа в два раза абсолютный размер рециркуляционной области уменьшается, а относительная протяженность области присоединения составляет  $x_R/H \approx 5,5$ , вблизи боковых

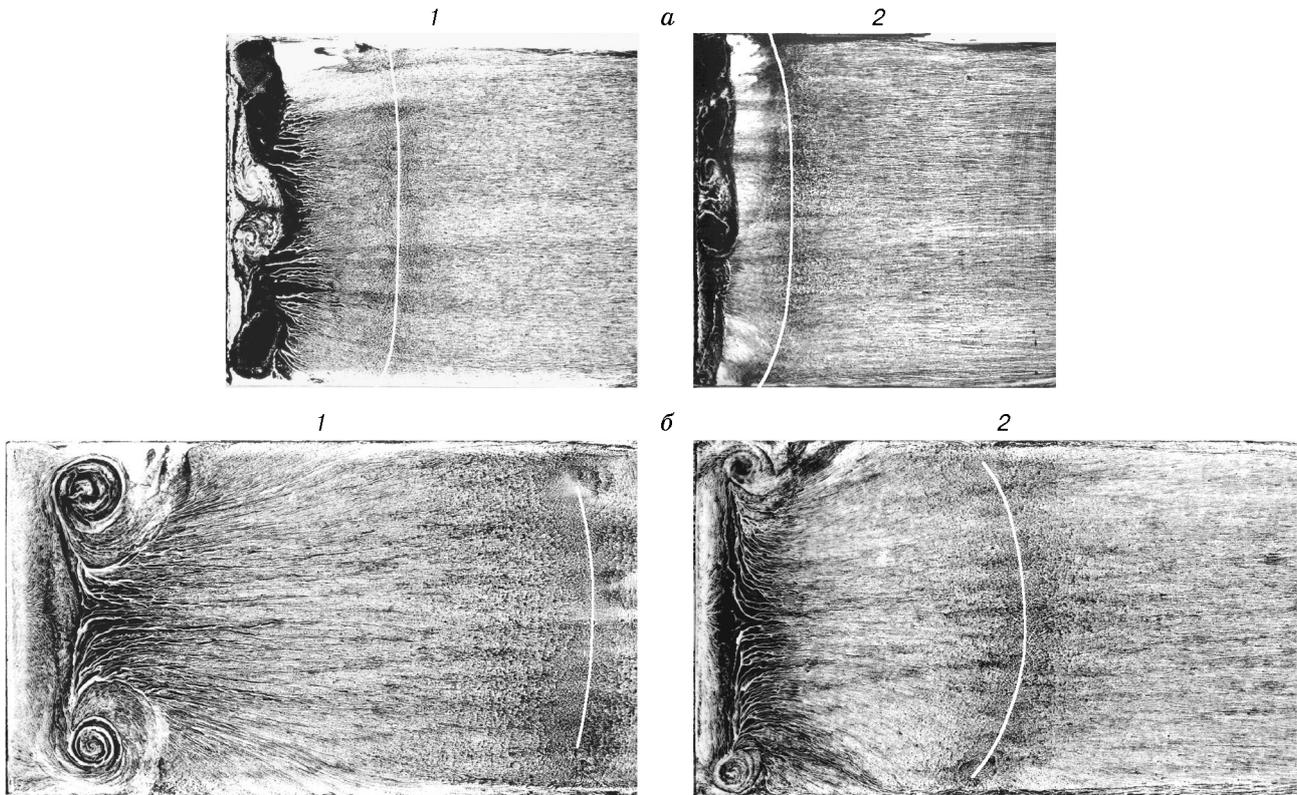


Рис. 2. Картина течения в отрывной области за уступом (*а*) и ребром (*б*):  
 1 —  $H = 20$  мм; 2 —  $H = 10$  мм; белая линия — осредненная область присоединения  
 потока  $x_R$

стенок —  $x_R/H = 4,0 \div 4,5$  (кадр 2 на рис. 2,*а*), т. е. кривизна линии присоединения значительно увеличивается. Это происходит из-за изменения высоты уступа. Чем меньше высота преграды, тем меньше радиус кривизны линии присоединения. За уступом высотой 10 мм присоединившийся поток, двигаясь вверх по течению, отрывается от поверхности на расстоянии  $x/H = 1,5 \div 2,5$ , при этом область вторичного вихря составляет не более половины протяженности отрывной зоны. Структура при этом несимметричная и может быть представлена пятью вихрями, имеющими различные форму, размеры и интенсивность вращения. Число вихревых структур во вторичной зоне зависит от отношения высоты уступа к высоте канала перед отрывом, а также от ширины канала.

За ребром высотой 20 мм (кадр 1 на рис. 2,*б*) осредненная область присоединения вдоль оси симметрии пластины локализуется на расстоянии  $x_R/H \approx 16,5$ , т. е. существенно дальше, чем за уступом той же высоты, что соответствует результатам других работ. Область присоединения за ребром имеет бóльшую кривизну, чем за уступом, так как влияние крупных пространственных вихрей ослабевает по мере удаления от препятствия. Приближаясь к боковым стенкам канала, линия области присоединения изгибается в сторону ребра, располагаясь на расстоянии от него  $x/H \approx 15,7$ , что хорошо согласуется с результатами визуализации течения за ребром высотой 22 мм, приведенными в работе [11], в которой  $x_R/H \approx 17,2$  вдоль центральной линии,  $x_R/H \approx 15$  вблизи боковых стенок. Часть потока после присоединения устремляется к преграде (кадр 1 на рис. 2,*б*). Поток отрывается от поверхности пластины на расстоянии от ребра, примерно равном  $2H$  вдоль центральной линии. При этом протяженность основного рециркуляционного вихря больше, чем при обтекании уступа. В угловой зоне наблюдаются мощные вихри, размер

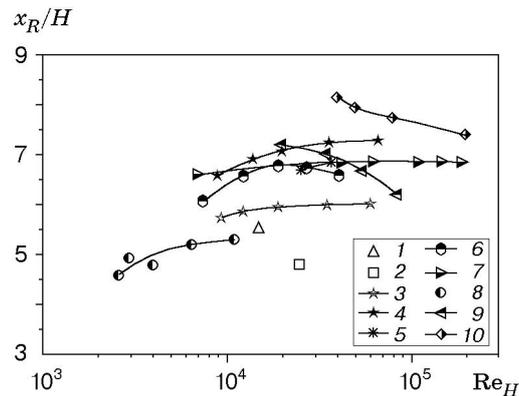


Рис. 3. Зависимость длины области присоединения от числа Рейнольдса, рассчитанного по высоте уступа:

1 —  $H = 10$  мм,  $ER = 1,07$ ; 2 —  $H = 20$  мм,  $ER = 1,14$ ; 3 —  $ER = 1,14$  [18]; 4 —  $ER = 1,25$  [18]; 5 —  $ER = 1,2$  [20]; 6 —  $ER = 1,25$  [3]; 7 —  $ER = 1,262$  [19]; 8 —  $ER = 1,31$  [17]; 9 —  $ER = 1,64$  [5]; 10 —  $ER = 1,67$  [16]

которых соизмерим с высотой преграды, в то время как за уступом они слабо выражены. За ребром высотой 10 мм расстояние до осредненной области присоединения увеличивается вдоль центральной линии до  $x_R/H \approx 18,5$  (кадр 2 на рис. 2, б), а вблизи боковых стенок ( $z/H \approx 1,5$ ) составляет примерно  $16H$ . Линия области присоединения при этом сильно изогнута. Как и для ребра высотой 20 мм, длина вторичной зоны в центре составляет примерно  $2H$ .

Существенное различие течения за уступом и ребром определяется его предысторией. Перед ребром образуется рециркуляционное течение, влияющее на развитие слоя смещения и, как показано ниже, на распределение коэффициента давления и максимальной скорости возвратного потока. Структура течения во вторичной зоне отрыва за ребрами высотой 20 и 10 мм качественно одинаковая, а за уступами такой же высоты различна. Это объясняется тем, что данное отрывное течение зависит от таких параметров, как отношение ширины канала к высоте уступа, относительное расширение канала ( $ER = S/S_0$  — отношение высот канала после расширения и до него) и отношение высоты преграды к толщине пограничного слоя  $H/\delta$ .

Одним из основных параметров, характеризующих структуру отрывного течения, является размер области присоединения. На рис. 3 показана зависимость координаты точки присоединения от скорости потока (числа Рейнольдса). Видно, что разброс опытных данных, полученных в различных работах, достаточно велик:  $4,5 < x_R/H < 8,5$ . Однако влияние числа Рейнольдса, когда оно изменялось только за счет скорости, на протяженность рециркуляционной зоны практически отсутствует. В то же время значительное влияние на размер области присоединения оказывают такие параметры, как  $H/\delta$  (в данной работе) и стесненность канала (при  $ER = 1,14; 1,25$  [18]).

Представленные на рис. 4 распределения статического давления за преградами позволяют анализировать пристенную область, которая оказывает существенное влияние на трение, теплообмен и структуру отрывного течения в целом. На рис. 4 представлено распределение давления за уступом и ребром. Коэффициент давления определяется по формуле  $C_p = 2(p - p_0)/(\rho U_0^2)$ , где  $p$  — статическое давление на стенке;  $p_0$ ,  $U_0$  — давление и скорость во внешнем потоке над уступом. Из рис. 4, а следует, что на распределение давления существенно влияет высота уступа. Вначале статическое давление на поверхности за уступом слабо уменьшается в области вторичного течения, а затем резко возрастает

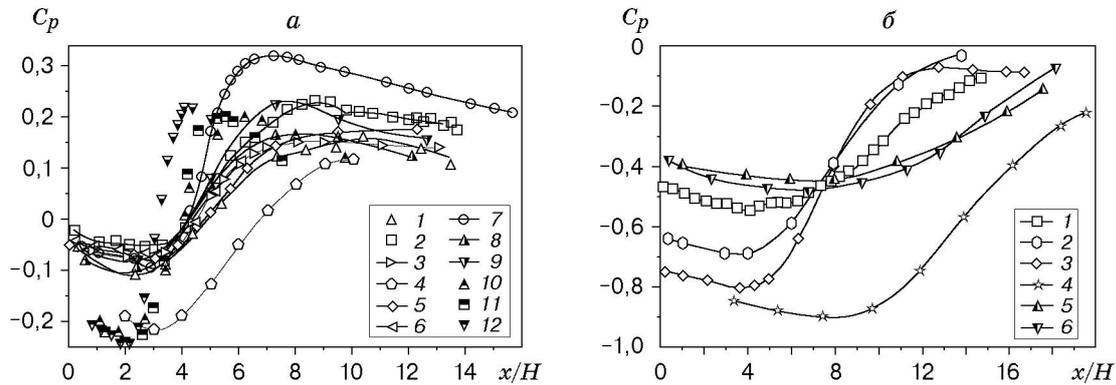


Рис. 4. Распределение коэффициента давления за уступом (а) и ребром (б):  
 а — 1 —  $H = 10$  мм; 2 —  $H = 20$  мм; 3 —  $H = 12,7$  мм [6]; 4 —  $H = 15$  мм [9];  
 5 —  $H = 38$  мм [20]; 6 —  $H = 38,1$  мм [2]; 7 —  $H = 51$  мм [8]; 8 —  $H = 10$  мм [21];  
 9 —  $H = 20$  мм [21]; 10 —  $H = 12$  мм [22]; 11 —  $H = 25$  мм [22]; 12 —  $H = 50$  мм [22];  
 б — 1 —  $H = 20$  мм; 2 —  $H = 5$  мм [23]; 3 —  $H = 19,05$  мм [12]; 4 —  
 $H = 23,9$  мм [10]; 5 —  $H = 15$  мм [24]; 6 —  $H = 30$  мм [24]

в направлении присоединения потока. При этом значение коэффициента давления максимально на расстоянии, почти в два раза большем (в работах [6, 9] примерно в 1,5 раза), чем размер области отрыва. С увеличением высоты препятствия увеличивается абсолютная величина коэффициента давления. Кроме того, увеличение высоты уступа вызывает смещение максимального значения коэффициента давления вверх по потоку. При увеличении высоты от 10 до 20 мм это смещение составляет примерно  $2H$ . Следует отметить, что в других работах (рис. 4,а) обнаружено аналогичное смещение максимума зависимости  $C_p(x/H)$ .

Распределения коэффициента давления за ребром и уступом существенно различаются. Во всей области течения за ребром наблюдается разрежение, и только при приближении к точке присоединения перепад давления стремится к нулю. Значительное различие наблюдается и в величине максимального разрежения. Если за уступом разрежение  $|C_p|_{\min} < 0,25$ , то при обтекании ребра величина разрежения существенно больше:  $|C_p|_{\min} \rightarrow 1$  (рис. 4,б). Уменьшение значения  $C_p$  на начальном участке канала до достижения минимума, как и при обтекании уступа, обусловлено существованием вторичного вихря.

С использованием традиционного метода обработки экспериментальных данных результаты, полученные в различных работах, не обобщаются. Интересные закономерности поведения давления за преградами выявляются, когда экспериментальные данные представлены в виде зависимости приведенного коэффициента давления от относительной продольной координаты (рис. 5). Приведенный коэффициент давления определялся согласно [25] по формуле  $\bar{C}_p = (C_p - C_{p,\min}) / (1 - C_{p,\min})$ , где  $C_{p,\min}$  — коэффициент давления в точке с наибольшим разрежением. Из рис. 5 следует, что высота уступа, в отличие от высоты ребра, существенно влияет на зависимость  $C_p(x/x_R)$ . Это связано с формированием перед ребром дополнительного отрыва потока, который гасит влияние предыстории потока. Образовавшееся перед преградой рециркуляционное течение уменьшает влияние внешних факторов — степени поджатия потока, скорости и т. д. Обобщить данные по коэффициентам давления за уступом не удастся, так как сильное воздействие на отрыв оказывает относительная толщина пограничного слоя.

Различие распределений давления за уступом и ребром влияет на интенсивность рециркуляционного движения в отрывной зоне и соответственно на максимальную скорость возвратного течения. В опытах с уступом  $-U_{\max}/U_0 < 0,3$ , в опытах с ребром

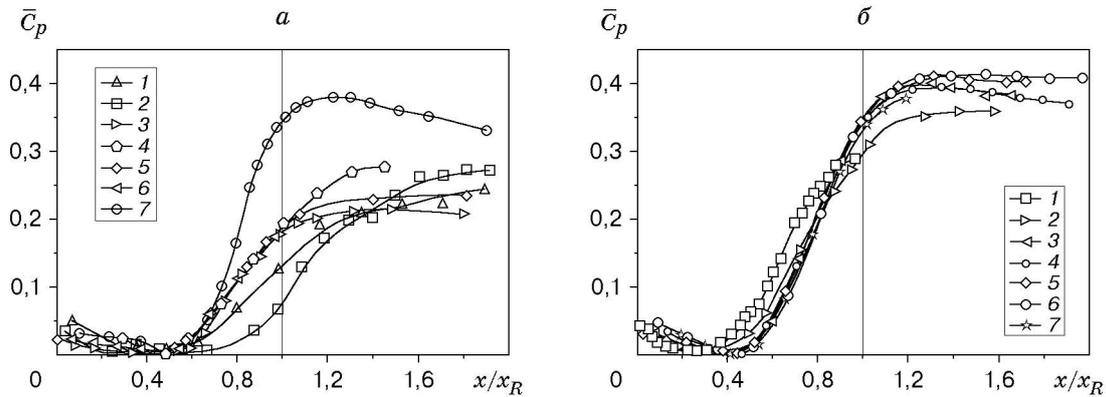


Рис. 5. Приведенный коэффициент давления за уступом (а) и ребром (б):  
 а — 1 —  $H = 10$  мм; 2 —  $H = 20$  мм; 3 —  $H = 12,7$  мм [6]; 4 —  $H = 15$  мм [9]; 5 —  
 $H = 38$  мм [20]; 6 —  $H = 38,1$  мм [2]; 7 —  $H = 51$  мм [8]; б — 1 —  $H = 20$  мм; 2 —  
 $H = 2,4$  мм [25]; 3 —  $H = 9$  мм [26]; 4 —  $H = 11$  мм [11]; 5 —  $H = 19,05$  мм [12]; 6 —  
 $H = 22$  мм [11]; 7 —  $H = 23,9$  мм [10]

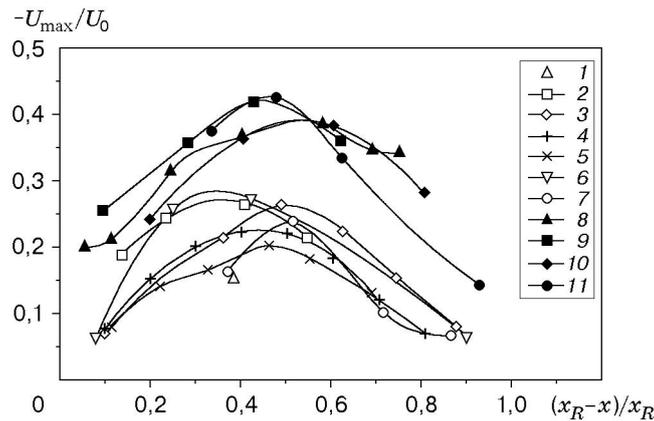


Рис. 6. Скорость возвратного течения в рециркуляционной зоне:  
 1–7 — за уступом (1 —  $H = 10$  мм; 2 —  $H = 20$  мм; 3 —  $H = 12$  мм [27]; 4 —  
 $H = 15$  мм [9]; 5 —  $H = 38,1$  мм [3]; 6 —  $H = 51$  мм [8]; 7 —  $H = 56$  мм [28]); 8–11 — за  
 ребром (8 —  $H = 10$  мм; 9 —  $H = 20$  мм; 10 —  $H = 10$  мм [29]; 11 —  $H = 22$  мм [11])

$-U_{max}/U_0 > 0,4$  (рис. 6). Таким образом, рециркуляционное течение за ребром более интенсивное, чем за уступом, а абсолютный максимум скорости возвратного течения в относительных координатах расположен дальше от области присоединения потока. В силу того, что слой смещения за ребром более толстый, а когерентные структуры крупнее, происходит интенсивный приток массы в рециркуляционную область. С увеличением высоты преграды скорость возвратного течения незначительно увеличивается.

**Заключение.** Установлено, что длина рециркуляционной области, толщина слоя смещения, величина и положение максимумов коэффициентов давления и скорости возвратного течения зависят от предыстории отрывного течения.

Из результатов визуализации обтекания уступа и ребра одинаковой высоты следует принципиальное различие структуры отрывного течения, особенно в области вторичного вихря. Так, в центральной части вблизи уступа наблюдаются дополнительные вихри, помимо угловых у боковых стенок. За ребром имеют место только угловые крупномасштабные вихревые структуры. Область присоединения за ребром более искривлена, чем за уступом.

Распределения приведенного коэффициента давления за ребром удалось представить в виде обобщенной зависимости, в то время как за уступом удовлетворительного обобщения экспериментальных данных не получено.

Максимальная скорость возвратного течения к уступу в рециркуляционной зоне составляет менее 30 % скорости набегающего потока, а в опытах с ребром превышает 40 %. С увеличением высоты преграды скорость рециркуляционного течения незначительно увеличивается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Алемасов В. Е., Глебов Г. А., Козлов А. П.** Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. Казань: Казан. филиал АН СССР, 1989.
2. **Adams E. W., Johnston J. P.** Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Pt 1. Pressure and turbulence quantities // *Exp. Fluids*. 1988. V. 6, N 6. P. 400–408.
3. **Adams E. W., Johnston J. P.** Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Pt 2. Reattachment length and wall shear stress // *Exp. Fluids*. 1988. V. 6, N 7. P. 493–499.
4. **Фогель Дж., Итон Дж.** Комбинированные измерения теплоотдачи и гидродинамических характеристик за обратным уступом // *Теплопередача*. 1985. Т. 107, № 4. С. 152–159.
5. **Westphal R. V., Eaton J. K., Johnston J. P.** A new probe for measurement of velocity and wall shear stress unsteady, reversing flow // *Trans. ASME. J. Fluids Engng.* 1981. V. 103. P. 478–482.
6. **Драйвер Д. М., Сигмиллер Х. Л., Марвин Дж. Г.** Нестационарные процессы в присоединяющемся слое смешения // *Аэрокосм. техника*. 1988. № 3. С. 35–42.
7. **Эббот Д. Е., Клайн С. Дж.** Экспериментальное исследование дозвукового турбулентного течения при обтекании одинарных и двойных уступов // *Техн. механика. Сер. Е*. 1962. Т. 84, № 3. С. 20–28.
8. **Chandrsuda C., Bradshaw P.** Turbulence structure of a reattaching mixing layer // *J. Fluid Mech.* 1981. V. 110. P. 171–194.
9. **Yang J. T., Tsai B. B., Tsai G. L.** Separated-reattaching flow over a backstep with uniform normal mass bleed // *Trans. ASME. J. Fluids Engng.* 1994. V. 116. P. 29–35.
10. **Castro I. P., Haque A.** The structure of a turbulent shear layer bounding a separation region // *J. Fluid Mech.* 1987. V. 179. P. 439–468.
11. **Ruderich R., Fernholz H. H.** An experimental investigation of a turbulent shear flow with separation, reverse flow, and reattachment // *J. Fluid Mech.* 1986. V. 163. P. 283–322.
12. **Cherry N. J., Hillier R., Latour M. E. M.** Unsteady measurements in a separated and reattaching flow // *J. Fluid Mech.* 1984. V. 144. P. 13–46.
13. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** Effect of free-stream turbulence on heat transfer behind a rib and inclined downward step // *Proc. of the 11th Intern. heat trans. conf., Kyongju, Korea, Aug. 23–28, 1998.* Kyongju: Korean soc. of mech. engrs, 1998. V. 3. P. 189–194.
14. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** The structure of the separated flow behind obstacles at high external turbulence // *Proc. of the 9th Intern. conf. on the methods of aerophys. res., Novosibirsk, 29 June — 3 July, 1998.* Novosibirsk: Inst. of theoret. and appl. mech., 1998. Pt 1. P. 220–227.
15. **Simpson R. L.** Turbulent boundary-layer separation // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1989. V. 21. P. 205–234.
16. **Итон Дж. К., Джонстон Дж. П.** Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // *Ракет. техника и космонавтика*. 1981. Т. 19, № 10. С. 7–19.

17. **Комаров П. Л., Поляков А. Ф.** Исследование характеристик турбулентности и теплообмена за обратным уступом в щелевом канале. М., 1996. (Препр. / РАН. Ин-т высоких температур; № 2-396).
18. **Пядишюс А., Шланчяускас А.** Турбулентный теплоперенос в пристенных слоях. Вильнюс: Мокслас, 1987.
19. **Jaňour Z., Jonáš P.** On the flow in a channel with a backward-facing step on one wall // Engng Mech. 1994. V. 1, N 5/6. P. 313–320.
20. **Jovic S.** An experimental study of a separated/reattached flow behind a backward-facing step.  $Re_H = 37000$ : Techn. Memorandum / NASA. N 110384. California, 1996.
21. **Tani I., Iuchi M., Komoda H.** Experimental investigation of flow separation associated with a step or groove. Tokyo, 1961. (Rep. / Aeronaut. Res. Inst., Univ. of Tokyo; N 364).
22. **Крюков В. Н.** Исследование турбулентного отрыва за уступом, расположенным по потоку // Отдельные задачи тепло- и массообмена между потоками и поверхностями: Сб. науч. тр. М.: Моск. гос. авиац. ин-т, 1986. С. 24–28.
23. **Nakamura Y., Ozono S.** The effects of turbulence on a separated and reattaching flow // J. Fluid Mech. 1987. V. 178. P. 477–490.
24. **Власов Е. В., Гиневский А. С., Каравосов Р. К., Франкфурт М. О.** Пристеночные пульсации давления в зоне отрыва за двумерными препятствиями // Тр. ЦАГИ. 1982. Вып. 2137. С. 3–29.
25. **Roshko A., Lau J. C.** Some observations on transition and reattachment of free shear layer in incompressible flow // Proc. of the Heat trans. and fluid mech. inst. Stanford: Stanford Univ. Press, 1965. P. 157–167.
26. **Hillier R., Cherry N. J.** The effects of free-stream turbulence on separation bubbles // J. Wind Engng Industr. Aero. 1981. V. 8. P. 49–58.
27. **Ruck B., Makiola B.** Flow over single-sided backward-facing steps with angle variations // Proc. of the 3rd Intern. conf. on laser anemometry adv. and applicat. Swansea: S. n., 1989. P. 40.1–40.10.
28. **Troutt T. R., Scheelke B., Norman T. R.** Organised structures in a reattaching separated flow field // J. Fluid Mech. 1984. V. 143. P. 413–427.
29. **Kiya M., Sasaki K.** Structure of a turbulent separation bubble // J. Fluid Mech. 1983. V. 137. P. 83–113.

*Поступила в редакцию 8/IV 2002 г.,  
в окончательном варианте — 29/IV 2002 г.*

---