

УДК 536.24: 532.526.5

## **Турбулентное перемешивание возмущений от малой преграды с отрывным сдвиговым слоем за уступом\***

**А.Ю. Дьяченко, Я.И. Смутьский, В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина**

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

E-mail: yarygina@itp.nsc.ru

Рассматривается один из перспективных и наиболее простых способов дополнительной интенсификации обменных процессов и теплоотдачи в отрывном потоке за обратным уступом за счет использования перед ним малых преград — турбулизаторов с размерами, меньшими размеров основной преграды. В качестве турбулизаторов применялись сплошные мини-ребра, ребра-гребенки, отсоединенные от стенки мини-ребра. Интенсификация турбулентного перемешивания за преградой происходит за счет внесения двух- и трехмерных возмущений от малой преграды в отрывной сдвиговый слой за уступом. Представлены результаты подробного экспериментального исследования распределений давления и теплоотдачи при варьировании высоты и местоположения малого интенсификатора до обратной ступеньки. Проанализировано влияние на динамические и тепловые характеристики формы интенсификатора. По распределениям коэффициентов давления и теплоотдачи проведена оценка эффективности различного типа мини-преград и пределов их влияния на сопротивление и теплообмен.

**Ключевые слова:** обратный уступ, отрывной турбулентный поток, мини-турбулизаторы, термографическая визуализация, теплоотдача, коэффициенты давления, неустойчивость.

### **Введение**

Управление характеристиками теплопереноса в отрывных течениях с помощью малых преград является важным направлением в проблеме повышения надежности и эффективности теплоэнергетического оборудования и газотурбинных установок. Прежде всего, это связано с увеличением тепловых нагрузок и температуры теплоносителей [1–2]. Мини-преграды относятся к пассивным методам управления отрывными потоками. Они более доступны и просты в реализации по сравнению с активными методами, такими как наложенные пульсации скорости или вдув струи перед зоной отрыва. Мини-преграда в виде ребра высотой, значительно меньшей основного препятствия, с одной стороны, является вихреобразующим элементом с повышенной турбулентностью. С другой стороны, за малым препятствием образуется своя отрывная область с возвратной зоной и зоной релаксации. В слое смешения имеют место маломасштабные когерентные структуры. Понимание процесса взаимодействия двух отрывных течений с разными масштабами и присущими им когерентными структурами является целью изучения таких явлений.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-19-00402).

Представленная статья является логическим продолжением работы [3], где впервые были представлены результаты экспериментального исследования влияния на отрывное турбулентное течение и теплообмен в плоской поперечной полости вихревого следа от расположенного перед каверной вихреобразующего препятствия в виде малого поперечного ребра с высотой на порядок меньшей, чем глубина каверны. В опытах изменялся угол наклона передней и задней стенок каверны, варьировалась высота малого ребра и его расстояние до каверны. Показано, что внесение дополнительных вихревых возмущений в рециркуляционную зону приводит к заметным изменениям вихреобразования, распределений коэффициентов давления и теплоотдачи. Оптимальные значения высоты мини-преграды и ее местоположения определяются попаданием точки присоединения от малого препятствия в каверну или на заднюю стенку каверны. При этом максимальное значение коэффициента теплоотдачи возрастает по сравнению со случаем отсутствия вихреобразующего элемента до 30 %.

Кроме того, имеется ряд публикаций по исследованию взаимодействия вихревой пелены от малой преграды с отрывным течением за уступом [4–7]. В работах [8–12] рассматривалось влияние малых вихреобразователей на характеристики отрывного течения и за ступенькой, и в каверне. Показано, что использование, например, перед уступом малых поперечных ребер увеличивает локальную турбулентность, это, в свою очередь, снижает термическое сопротивление вблизи стенки и интенсифицирует скорость теплоотдачи. В имеющейся литературе в основном рассмотрены течения со сплошными мини-ребрами. Интересным представляется использование других типов турбулизаторов, например, отсоединенных ребер, отстоящих от стенки на 0,1 высоты ребра [13–14], или разнообразных табов — вкладок, зубцов или выступов [15–16]. Простейший вариант системы табов — поперечное ребро с прорезями, типа гребенки. Размер прорезей и расстояние между ними могут быть различными. Набегающий поток проходит через прорези и вызывает поперечную неравномерность, а также неоднородность по ширине канала в характеристиках отрывного течения за мини-ребром, что влияет на отрывную область за уступом.

В настоящей статье обсуждаются полученные опытным путем динамические и тепловые характеристики отрывного потока за обратным уступом при наличии вверх по течению двумерных и трехмерных малых преград.

### Экспериментальное оборудование

Программа экспериментальных исследований была проведена на двух установках. Для измерения скоростных характеристик в плоском канале со ступенькой методом PIV, а также некоторых тепловых параметров методом термопарных зондов и инфракрасной термографии был создан экспериментальный стенд [10, 11]. До расширения рабочая секция канала имела прямоугольное сечение высотой  $h_0 = 21$  мм и шириной 150 мм. Длина секции равнялась 1 м и была выполнена из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. На расстоянии 0,6 м от входа канала находился обратный уступ высотой  $H = 9$  мм, так что высота канала после расширения равнялась 30 мм. В качестве генератора вихревых возмущений в большинстве экспериментов служила поперечная квадратная призма высотой  $\Delta = 3$  мм и толщиной 3 мм (рис. 1а). На схеме показано, что течение направлено слева направо. Размеры призмы выбрали в соответствии с рекомендациями [5]. Дополнительно были проведены опыты с призмой высотой 6 мм, также были выполнены эксперименты, когда призма имела зазор со стенкой  $t = 0,7$  мм.

Для измерения коэффициентов теплоотдачи была изготовлена секция с подогревом участка, препарированного большим количеством термопар. Для нагрева стенки использовался ленточный нагреватель из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм с шириной

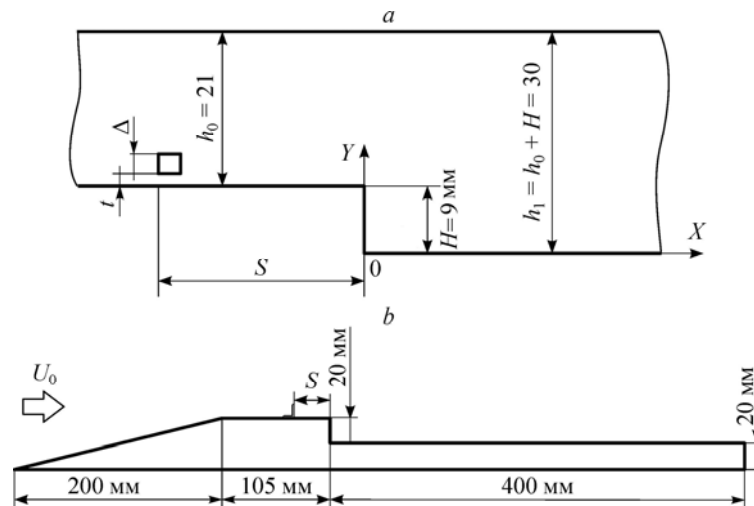


Рис. 1. Схемы рабочего канала с резким расширением при наличии перед ступенькой малой преграды (а) и модели для измерения коэффициентов давления и теплоотдачи в большой аэродинамической трубе (б).

дорожек 5 мм. По центральной линии канала на длине 370 мм было заделано 80 термодатчиков. Сначала на отрезке 25 мм — через 5 мм, на следующем отрезке длиной 150 мм — через 2,5 мм, затем на оставшейся длине — опять через 5 мм.

Эксперименты по измерению коэффициентов давления, термографической визуализации и циклу измерений по теплообмену проводились в аэродинамической трубе Института теплофизики СО РАН [3]. Аэродинамическая труба представляла собой разомкнутый воздушный контур с установленным на входе вентилятором. Сечение рабочего канала аэродинамической трубы составляло 200×200 мм. Длина канала равнялась 1000 мм. Перед основным рабочим каналом располагалась дополнительная секция того же сечения, что и рабочий канал, длиной ~1000 мм. На расстоянии 100 мм от входа на нижней стенке канала располагалась модель с отборами давления (рис. 1б), в других экспериментах на боковой стенке находился теплообменный участок. Ширина участков равнялась 190 мм. Зазор с боковыми стенками был заделан термостойкой мастикой. Модель состояла из конического обтекателя длиной 200 мм и высотой 40 мм с мелкоступенчатой шероховатостью и горизонтального участка длиной 105 мм. Далее имелся уступ высотой 20 мм и измерительный участок, выступающий над поверхностью стенки канала на 20 мм. Для динамической модели длина поверхности за ступенькой, имеющая в центральном сечении вниз по потоку отборы статического давления, была равна 400 мм. Отборы статического давления диаметром ~0,3 мм в центральном сечении на длине 100 мм за уступом располагались через 5 мм, а затем на длине 300 мм — через 9 мм. Также через 9 мм имелись отборы давления в двух поперечных сечениях: 37 и 270 мм за уступом.

Тепловой участок до ступеньки идентичен динамическому. С помощью ленточного нагревателя из алюминиевой фольги толщиной 36 мкм с шириной дорожек 5 мм в режиме постоянного теплового потока осуществлялся нагрев поверхности за уступом длиной 515 мм. Поверхность нагрева в центральном продольном сечении была препарирована через 20 мм тринадцатью хромель-копелевыми термодатчиками и через 30 мм еще восемью термодатчиками. Для оценки утечек тепла через пластину с обратной стороны было заделано две термодатчики. Степень перегрева поверхности относительно основного потока была невелика и не превышала  $\Delta T = T_w - T_0 < 50^\circ$ , поэтому влияние температурного фактора на закономерности теплообмена не учитывались.

Для определения распределения температур по всей поверхности пластины и для оценки среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи проводились эксперименты с использованием термографии. Для термографических измерений поверхность с уступом и нагревателем помещалась на боковую стенку заподлицо со стенкой канала. Противоположная стенка была выполнена из оптического стекла или в некоторых случаях заменялась полиэтиленовой пленкой. Тепловой участок прогревался в течение одного часа при необходимом скоростном режиме, после чего температура стенки измерялась тепловизором THERMO TRACER TH7102 IR Imager (Япония) со спектральным диапазоном 8–14 мкм. Оцифровка полученного поля температур производилась минимум по двум терморам, и построение термограмм выполнялись с использованием специальных компьютерных программ.

Скорость потока варьировалась от 10 до 30 м/с, что обеспечивало числа Рейнольдса по высоте уступа на первой установке  $Re_H = HU_0/\nu = 5000\text{--}15000$  и на большой аэродинамической трубе —  $Re_H = 13000\text{--}40000$ . При всех скоростях пограничный слой перед уступом был турбулентным. Толщина потери импульса пограничного слоя перед отрывом

$$\delta^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho U}{\rho_0 U_0} \cdot \left(1 - \frac{U}{U_0}\right) \cdot dy$$

рассчитывалась по экспериментальным профилям

скорости, измеренными датчиком Пито диаметром 0,4 мм, и изменялась в зависимости от числа Рейнольдса в диапазоне 3,2–3,7 мм, что соответствовало значению толщины пограничного слоя  $\delta \approx 35$  мм. Степень турбулентности набегающего потока в канале, измеренная с помощью термоанемометра DISA-55M, соответствовала естественной и составляла 1,2 %.

В качестве малой преграды применялось тонкое поперечное ребро высотой  $\Delta = 2,5, 5, 7,5$  и 10 мм, которое помещалось перед уступом на расстояниях от 0 до 80 мм. Также в опытах использовалось отсоединенное ребро при  $t = 1$  мм. Цикл экспериментов был выполнен с разрезным ребром-ребенкой высотой 10 мм, имеющим прорези шириной 5 мм через каждые 20 мм, 5 мм — через 5 мм и 10 мм — через 10 мм. Длина прорезей составляла 9 мм, то есть на высоте 1 мм снизу ребро оставалось сплошным.

## Результаты экспериментов

### Термографическая визуализация течения

Выполнена термографическая визуализация течения за ступенькой при наличии перед кромкой уступа сплошного мини-ребра и разрезных ребер-ребенок. Высота малых преград равнялась 10 мм. Эксперименты проводились при трех скоростях потока: 10, 20 и 30 м/с. Термограммы при использовании ребер-ребенок показали сильную перестройку температурного поля на границе вторичного вихря (рис. 2). Наблюдалось также значительное искривление границы вторичного вихря. Особенно это касается турбулизаторов 5×5 мм и 10×10 мм. Для разрезов шириной 5 мм через 20 мм тепловая картина получается близкой к той, что имеет место за сплошным мини-ребром.

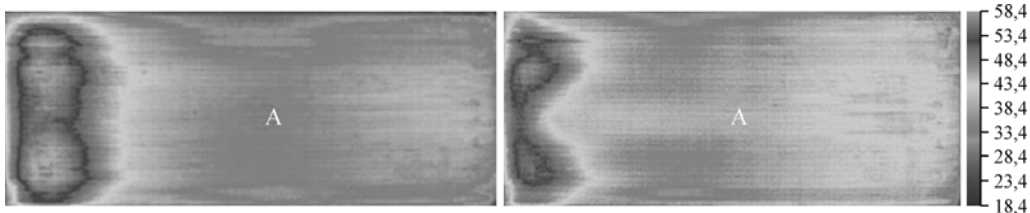


Рис. 2. Термограммы за расширением канала высотой 20 мм при наличии мини-ребра высотой 10 мм на кромке уступа (слева) и разрезного мини-ребра 10×10 мм той же высоты на кромке уступа (справа).

Кроме неравномерности распределения температур в поперечном направлении можно отметить повышение температуры в релаксационной области. Обнаруженные трехмерные эффекты оказывают существенное влияние на распределение коэффициентов давления и теплообмен.

### Профили скорости

Профили скорости в плоском канале высотой 21 мм до расширения канала со ступенькой высотой 9 мм измерялись для двух высот малого преграды: 3 и 6 мм при их расположении на разных расстояниях от уступа. Число Рейнольдса на входе составило  $Re_H = 10^4$ . Измерения выполнялись методом цифровой трассерной визуализации PIV. Комплекс PIV был оснащен двумя импульсными лазерами, которые были синхронизованы с цифровой камерой для измерения двумерного поля скорости. В представленных экспериментах интервал времени между вспышками лазера равнялся 20 мкс, а их длительность — 5 нс. Комплекс PIV был 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 со средним диаметром каплей  $\sim 1$  мкм. С целью увеличения пространственного разрешения вся измерительная область была поделена на участки. Размер участка составлял  $\sim 30 \times 40$  мм. 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 50 % перекрытием расчетных областей. Затем происходил отбор по отношению сигнал/шум и отбор по локальному среднему значению, в основе которого лежат соображения о локальной непрерывности поля скорости.

Как видно на рис. 3, при расположении малого ребра высотой 3 мм перед уступом профили скорости сильно деформированы по сравнению с базовым случаем отсутствия ребра. Наибольшая разница с базовым профилем соответствует расположению

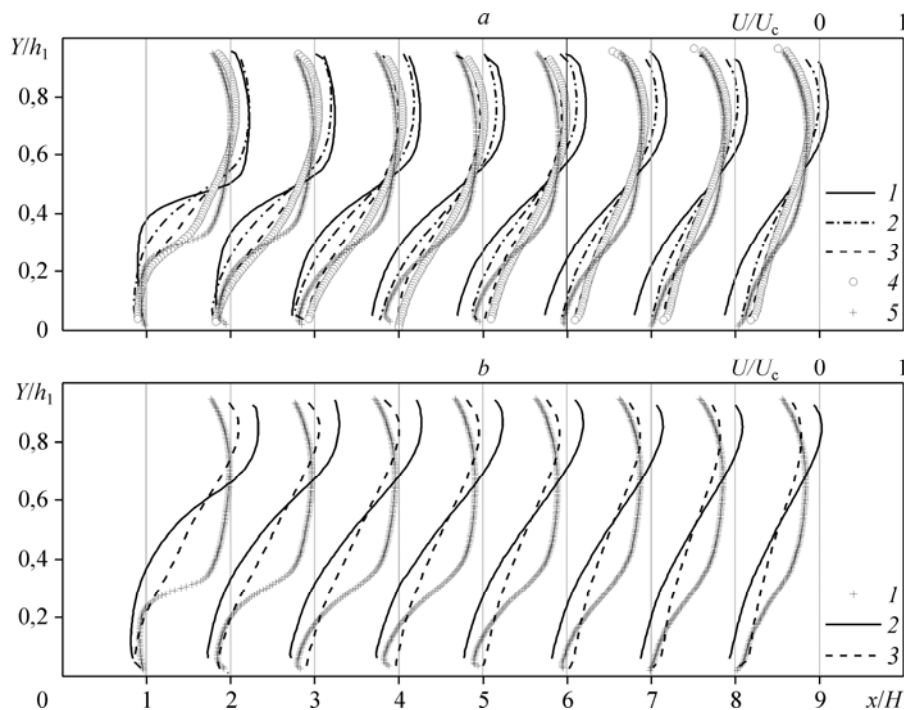


Рис. 3. Профили скорости с мини-ребром высотой 3 (а) и 6 (б) мм на разных расстояниях  $S$  от уступа. а —  $S = 3$  (1), 20 (2), 40 (3), 60 (4) мм, без ребра (5); б — без ребра (1),  $S = 40$  (2), 80 (3) мм.

мини-ребра вблизи кромки уступа. Отличие в профилях скорости уменьшается вниз по потоку, но на расстояниях, существенно превышающих длину отрывной области за уступом ( $x_r \sim 6H$ ). В случае, когда мини-преграда расположена на расстояниях от 40 до 60 мм от уступа и при этом точка присоединения за ребром находится до уступа, профили средней продольной скорости с малой преградой получаются близкими к профилям в ее отсутствии. При этом относительная величина  $S/H$  изменялась в пределах от 0 до 8,88. Для более высокой преграды разница в профилях с преградой и без нее оказывается значительнее (можно сравнить линии 4 и 5 на рис. 3а и линии 1 и 2 на рис. 3б). Сближение профилей скорости при удалении мини-ребра от уступа с базовым профилем для более высокого ребра происходит менее интенсивно. Если провести сравнение при одинаковых величинах  $S/\Delta$  (кривые 2 и 5 на рис. 3а с кривыми 2 и 1 на рис. 3б и кривые 3 и 5 на рис. 3а с кривыми 3 и 1 на рис. 3б), то видно, что тенденция сохраняется.

#### Длина отрывной области

На поле векторов скорости по координате точки, где происходит изменение знака продольной скорости в пристенной области течения, было оценено положение точки присоединения сдвигового потока за уступом. Размеры отрывной зоны при наличии и отсутствии вихревого генератора представлены на рис. 4. При расположении вихреобразующего элемента на передней кромке уступа длина отрывной области значительно возрастает — на 60 %. При увеличении расстояния от малого препятствия до уступа длина отрывной области уменьшается. Максимальное сокращение отрывной области соответствует относительной величине местоположения препятствия  $S/\Delta = 13$ . Авторы работы [6] предположили, что именно при наибольшем сжатии отрывной зоны имеет место наиболее выраженная интенсификация теплоотдачи. Согласно рис. 4 сокращение отрывной области под влиянием вихревого элемента составило около 30 %. Однако при расположении мини-преграды на расстояниях от уступа  $S/\Delta > 13$  величина  $x_r/x_{r0}$  вновь возрастает. Точка присоединения за отрывной зоной от дополнительного элемента, расположенного при  $S/\Delta = 13$ , попадает в начало отрывной области за уступом.

#### Коэффициенты давления

В аэродинамической трубе вниз по потоку за уступом с дополнительной малой преградой были измерены распределения статического давления и рассчитаны коэффициенты давления  $C_p = 2(p_i - p_0)/\rho U_0^2$ . Опыты проводились при семи значениях скорости набегающего потока в промежутке от 10 до 40 м/с. Высота мини-ребра варьировалась от 2,5 до 10 мм, а расстояние его до уступа, имеющего высоту 20 мм, изменялась от 0 до 80 мм.

Влияние высоты ребра вблизи кромки уступа на распределение коэффициентов давления за уступом представлено на рис. 5. Эти типичные зависимости получены при скорости потока

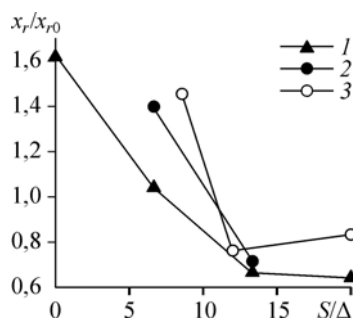


Рис. 4. Относительная длина отрывной области за ступенькой в зависимости от высоты малой преграды  $\Delta$  и ее местоположения  $S$ .  $\Delta/H = 1/3$  (1),  $2/3$  (2),  $S/H = 4$  [6] (3).

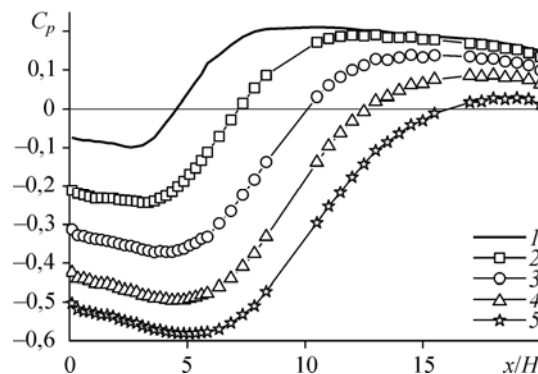


Рис. 5. Влияние высоты мини-ребра на кромке уступа на коэффициент давления в миделевом сечении за уступом. При отсутствии мини-турбулизатора (1),  $\Delta = 2,5$  (2), 5 (3), 7,5 (4), 10 (5) мм.

до расширения канала 30 м/с. Чем выше ребро, тем более значительное разрежение наблюдается в области рециркуляции за уступом.

Взаимосвязь коэффициентов давления с местоположением преграды для трех высот мини-ребра при скорости 30 м/с показана на рис. 6. Все распределения коэффициентов давления  $C_p$  для разных  $S$  при наименьшей высоте мини-преграды ( $\Delta = 2,5$  мм, см. рис. 6a) сгруппированы около зависимости, относящейся к случаю отсутствия преграды. Разница в значениях  $C_p$  наблюдается лишь для расположения преграды на кромке уступа. Для более высоких малых элементов распределения коэффициентов давления все больше расслаиваются (рис. 6b, 6c). Наиболее сильное разрежение в отрывной области наблюдается при  $S = 80$  мм. При  $\Delta = 7,5$  мм минимальное значение  $C_p$  снижается с  $-0,1$  до  $-0,5$ , а при  $\Delta = 10$  мм — до  $-0,6$ .

Иная картина наблюдается для разрезных мини-ребер в виде гребенки. При их обтекании имеют место вертикальные протоки воздуха, которые, как было показано термографической визуализацией, за счет эффектов трехмерности существенно изменяют и температурное поле отрывной области за уступом, и распределения коэффициентов давления.

На рис. 7 представлены типичные распределения коэффициентов давления в миделевом сечении за уступом  $H = 20$  мм при наличии разрезных ребер-гребенок трех типов высотой 10 мм, находящихся на расстоянии  $S = 60$  мм от ступеньки, при скорости потока на входе  $U_0 = 40$  м/с. (Эксперименты проведены также при  $S = 0, 20, 40$  и 80 мм и скоростях  $U_0 = 20$  и 30 м/с.) Наибольшее влияние на коэффициент давления оказывает ребро-гребёнка с более мелкими и редкими прорезями.

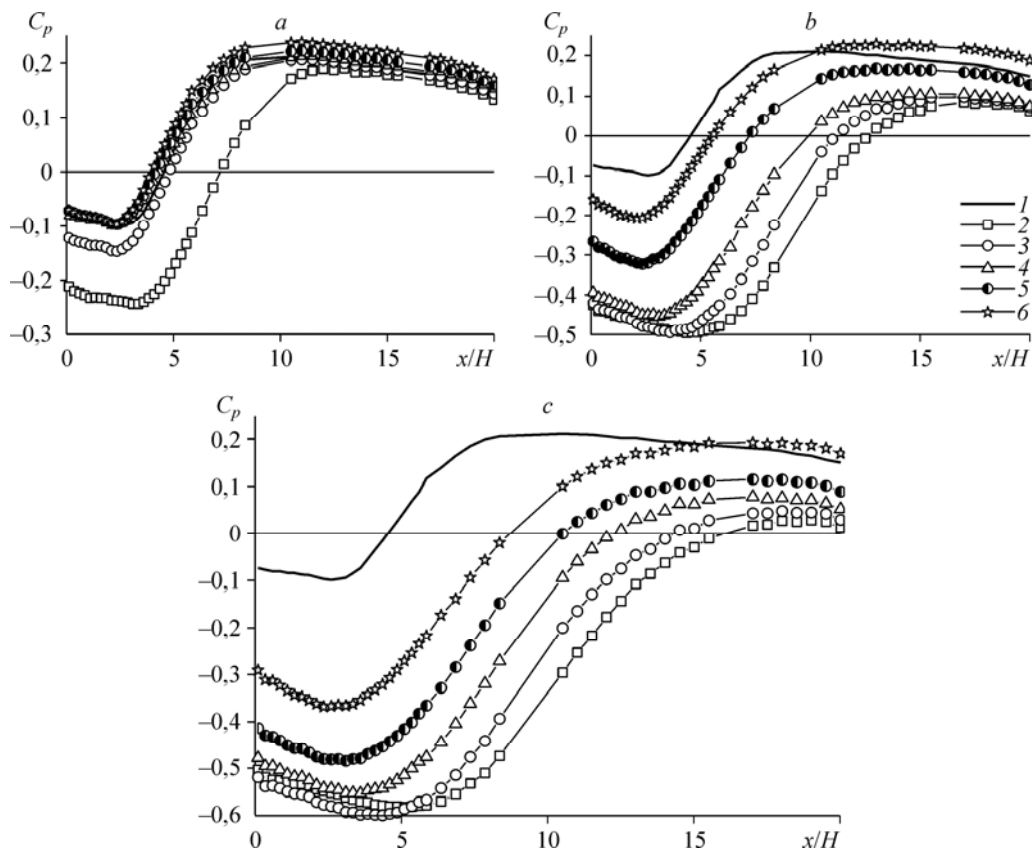


Рис. 6. Распределения коэффициентов давления за уступом высотой  $H = 20$  мм при высоте сплошного мини-ребра  $\Delta = 2,5$  (a),  $7,5$  (b),  $10$  (c) мм и различных расположениях  $S$  малой преграды до уступа.

При отсутствии мини-ребра (1),  $S = 0$  (2), 20 (3), 40 (4), 60 (5), 80 (6) мм.

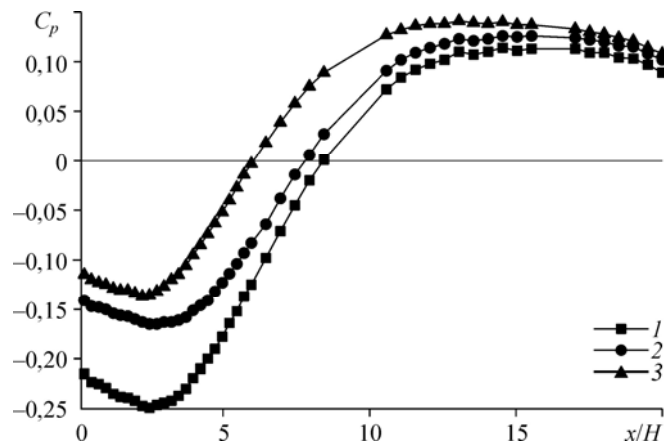


Рис. 7. Влияние типа разрезного турбулизатора-ребёнки на распределения коэффициентов давления.  
Гребёнка 5×20 (1), 5×5 (2), 10×10 (3).

На рис. 8 продемонстрированы коэффициенты давления вниз по потоку за уступом той же высоты  $H = 20$  мм для сплошного мини-ребра и для этого же мини-ребра, но отстоящего от стенки на 1 мм, а также для разрезного ребра-ребёнки с прорезями шириной 5 мм через каждые 20 мм. Высота всех малых преград составляла 10 мм и они располагались на расстоянии 60 мм до уступа. Скорость обтекания интенсификаторов составляла 30 м/с. Небольшое понижение коэффициентов давления по сравнению с результатами опытов со сплошной преградой наблюдается для отсоединенного от стенки турбулизатора в зоне присоединения и релаксации. Распределение коэффициентов давления для разрезного мини-ребра-ребёнки приближается к случаю отсутствия малого турбулизатора.

Таким образом, можно констатировать, что разрезные турбулизаторы оказывают меньшее воздействие на поля давления, чем сплошные поперечные ребра. Особенно это относится к гребенкам с частыми прорезями.

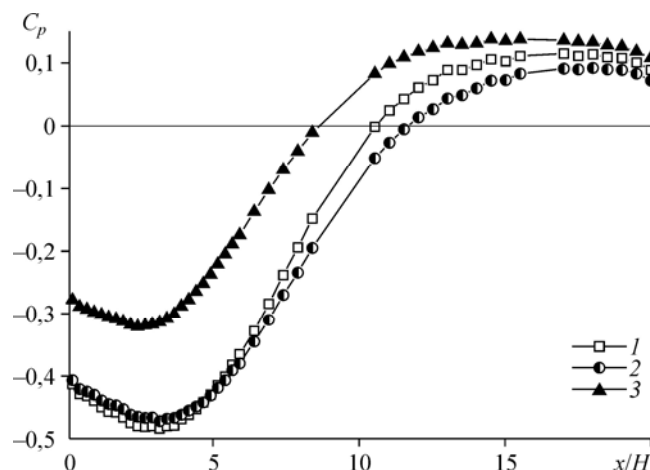


Рис. 8. Распределения коэффициентов давления с тремя типами интенсификаторов.  
1 — сплошное мини-ребро, 2 — ребро с зазором от стенки, 3 — ребро-ребёнка.



### Коэффициенты теплоотдачи

В текущем разделе обсуждается, как особенности отрыва за различными преградами перед расширением канала влияют на теплообмен в отрывной зоне за уступом. Коэффициенты теплоотдачи за уступом рассчитывались как по тепловизионным, так и по термометрическим измерениям. Коэффициент теплоотдачи определялся по температурному напору между стенкой и ядром потока  $\alpha = q_{ст}/(T_{ст} - T_0)$ .

Влияние высоты малой сплошной преграды на распределение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  представлено на рис. 9. Эксперименты проводились при высоте уступа 9 мм, высотах турбулизатора 3 и 6 мм и числе Рейнольдса  $Re_H = 10^4$ . Местоположение преграды варьировалось. При меньшей высоте мини-ребра интенсификация максимальной теплоотдачи за уступом равняется 30 % по сравнению со случаем отсутствия дополнительного элемента; при большей высоте,  $\Delta = 6$  мм, интенсификация достигает 50 %. Это отмечается при близком расположении преграды к уступу,  $S = 20$  мм. Чем дальше от ступеньки находится ребро, тем сильнее распределение коэффициента теплоотдачи приближается к зависимости для случая, когда оно отсутствует. При этом длина отрывной области сокращается примерно на калибр. В релаксационной области присутствие вихревого генератора перестает ощущаться примерно на тридцати пяти калибрах для ребра высотой 3 мм и на сорока калибрах — для более высокой преграды,  $\Delta = 6$  мм.

На рис. 10 продемонстрированы характерные графики распределения чисел Нуссельта  $Nu = \alpha H/\lambda$  для сплошного и отсоединенного от стенки турбулизаторов в сравнении со случаем отсутствия малой преграды. Опыты проведены при числах Рейнольдса  $5 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $1,5 \cdot 10^4$ . Все остальные условия те же, что и на рис. 9. Данные на рис. 10 соответствуют числу Рейнольдса  $Re_H = 10^4$ . Если на рис. 10 интенсификация теплоотдачи в точке максимума со сплошным мини-ребром составила  $\sim 28$  %, то для ребра с зазором у стенки интенсификация в точке максимума несколько меньше и равна 21 %. При этом положение максимума числа  $Nu$  с турбулизаторами сдвинуто ближе к уступу по сравнению со случаем их отсутствия. Для обоих интенсификаторов распределения в релаксационной области идентичны. Использование отсоединенных ребер как мини-преград является неэффективным, хотя по данным работы [13] в массиве ребер их

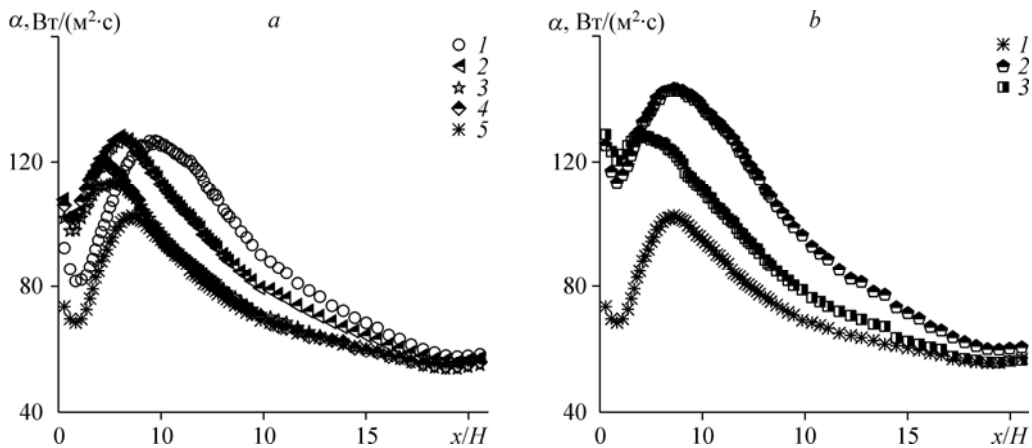


Рис. 9. Распределение коэффициента теплоотдачи в отрывной области за уступом при наличии мини-турбулизатора высотой 3 (а) и 6 (б) мм на разных расстояниях от уступа.  
а —  $S = 3$  (1), 20 (2), 40 (3), 60 (4) мм, без ребра (5); б — без ребра (1),  $S = 40$  (2), 80 (3) мм.

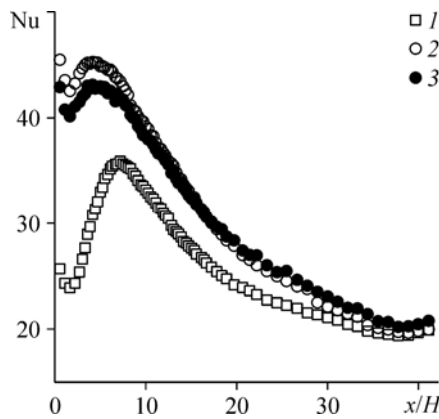


Рис. 10. Распределение числа Нуссельта за уступом высотой 9 мм.

1 — при отсутствии мини-турбулизатора, 2 — с интенсификатором высотой 6 мм на расстоянии 80 мм от уступа, 3 — с предыдущим интенсификатором, имеющим зазор со стенкой 0,7 мм.

эффективность при зазоре, равном 0,1 высоты ребра, составляет 40 %. Возможно, это связано со спецификой нашего эксперимента. В соответствии с выводами работы [17] малый зазор между ребром и стенкой канала приводит к сокращению длины отрывной области. Для  $S = 80$  мм точка присоединения потока в случае

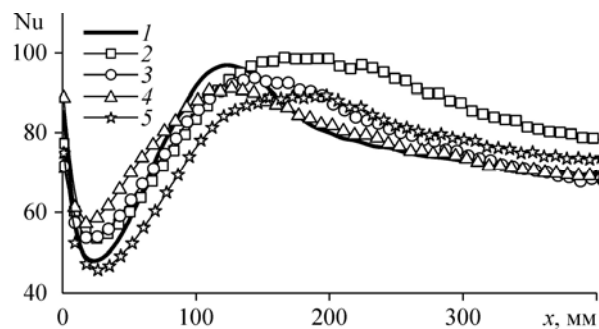
сплошного препятствия попала в область непосредственно за кромкой уступа, а в случае отсоединенного препятствия сместилась вверх по потоку от этой кромки, что и могло вызвать снижение уровня интенсификации теплоотдачи для отсоединенного препятствия (рис. 10). Это также объясняет противоречие полученных результатов и данных работы [13].

Любопытный результат по теплообмену получен для разрезных ребер-гребенок высотой 10 мм методом термографии (рис. 11). Эксперименты выполнены при скорости набегающего потока  $U_0 = 20$  м/с. Турбулизаторы находились на расстоянии 40 мм до уступа, высота которого равнялась 20 мм. Для сплошного мини-ребра интенсификация теплоотдачи для максимального значения числа Нуссельта не столь очевидная, как на рис. 9. В этом случае наблюдается более растянутый сглаженный максимум теплоотдачи, что, вероятнее всего, связано с почти сомкнувшимися толстыми пограничными слоями. Заметное увеличение теплоотдачи до 20 % отмечается в релаксационной области. В соответствии с термограммами (рис. 2), показавшими увеличение температуры и сокращение отрывной области для гребенки  $10 \times 10$  мм, можно ожидать снижения теплообмена по сравнению со сплошным мини-ребром. Однако из-за большой разницы в структуре обтекания различных турбулизаторов-гребенок, тепловая картина получается далеко неоднозначной.

На рис. 11 представлены числа Нуссельта для трех вариантов разрезных ребер-гребенок, отстоящих на 40 мм от ступеньки. В отрывной области максимальное снижение теплоотдачи имеет место при использовании турбулизатора  $5 \times 5$  мм, при этом теплоотдача выходит ниже, чем при отсутствии малой преграды. В области релаксации величина теплообмена имеет такие же значения, как и при отсутствии мини-ребра при разрезной гребенке  $10 \times 10$  мм. Полученные результаты по теплообмену находятся в полном соответствии с данными по коэффициентам давления (рис. 8).

Рис. 11. Сравнение распределений коэффициентов теплоотдачи вдоль канала.

Гладкий уступ (1), уступы с мини-ребром высотой 10 мм (2), с разрезным ребром (высотой 10 мм с пропилами  $5 \times 20$  мм) (3), с разрезным ребром ( $10 \times 10$  мм) (4), с разрезным ребром ( $5 \times 5$  мм) (5).



### Заключение

Экспериментально продемонстрированы сложные процессы, происходящие при взаимодействии двух отрывных турбулентных течений с разными масштабами. Проведенные исследования показали существенное влияние на динамические и тепловые характеристики в отрывной области за обращенным назад уступом вихревой пелены с повышенной турбулентностью, рождаемой низкой преградой, установленной перед ступенькой.

Показано, что большую роль играют местоположение малой преграды, ее высота и тип турбулизатора. При попадании точки присоединения от малой преграды в область основного вихря вихревой слой взаимодействует с отрывом и сокращает область рециркуляции. Наибольший эффект приходится на случай, когда  $S/\Delta = 13$ . Более высокие ребра имеют более деформированный профиль скорости в отрывной области за уступом (рис. 3) и более медленное восстановление распределения скорости по безразмерной координате  $x/H$  до профиля при отсутствии малого турбулизатора. Также для них отмечается возрастание слоя смешения.

Перестройка течения отражается на поведении коэффициентов давления. На примере сплошной мини-преграды показано, что максимальное снижение давления в области разрежения относится к местоположению малой преграды вблизи кромки уступа. Особенно это касается более высоких ребер. Чем дальше преграда расположена от ступеньки, тем ближе распределения коэффициента давления к распределению для случая отсутствия малой преграды.

За вихревым генератором значение коэффициента теплоотдачи заметно возрастает по сравнению со случаем его отсутствия. Влияние на теплообмен получается более сильным для высоких преград, находящихся вблизи кромки уступа. При удалении преграды от уступа влияние мини-ребра ослабевает и при  $S/H > 10$  перестает быть заметным. Геометрические размеры канала также оказывают влияние на взаимодействие двух отрывных потоков. Так, в большом канале аэродинамической трубы интенсификация в значительной степени наблюдается не по максимальному коэффициенту теплоотдачи, а по заметному увеличению его значений в релаксационной зоне.

Исследование малых преград, создающих трехмерные эффекты, показало, что мини-ребра с поддувом через щель у стенки с точки зрения интенсификации теплоотдачи оказались менее эффективными, чем сплошные ребра. Это же подтверждается и распределениями коэффициентов давления.

Иная картина реализуется с разрезными мини-ребрами в виде гребенки. Здесь имеют место вертикальные протоки воздуха, которые за счет эффектов трехмерности существенно изменяют температурное поле отрывной области за уступом. Это наглядно продемонстрировала термографическая визуализация теплового поля за уступом. Граница области вторичного вихря сильно искажается и отмечается общее повышение температуры стенки при одной и той же тепловой нагрузке. Менее эффективными в отрывной области, даже по сравнению с гладким уступом без препятствия, являются ребра-гребенки с частыми пропилами  $5 \times 5$  мм, которые до точки отрыва являются плохими интенсификаторами. Однако компенсация осуществляется за счет увеличения теплообмена в зоне релаксации.

### Условные обозначения

$C_p$ — коэффициент давления, $C_p = 2(p_1 - p_0) / \rho U_0^2$ ,	$U_0$ — скорость набегающего потока, м/с,
$H$ — высота ступеньки, мм,	$x$ — продольная координата, мм,
$h_0$ — высота канала до расширения, мм,	$x_r$ — точка присоединения отрывного сдвигового
$h_1$ — высота канала после расширения, мм,	слоя, мм,
$Nu$ — число Нуссельта; $Nu = \alpha h_1 / \lambda$ ,	$y$ — поперечная координата, мм,
$p$ — давление, Н/м <sup>2</sup> ,	$\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/м <sup>2</sup> , К,

Re — число Рейнольдса,  $\Delta$  — высота вихревого генератора, мм,  
S — расстояние от малой преграды до уступа, мм,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/мК,  
t — расстояние от мини преграды до стенки, мм,  $\nu$  — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с,  
U — продольная скорость, м/с,  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>.

### Индексы

0 — параметры в основном потоке, m — характеристики в миделевом сечении,  
ст — параметры на стенке,

### Список литературы

1. **Togun H., Kazi S.N., Badarudin A.A** Review of experimental study of turbulent heat transfer in separated flow // Australian J. of Basic and Applied Sci. 2011. Vol. 5, No. 10. P. 489–505.
2. **Леонтьев А.И., Олимпиев В.В.** Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 1. С. 7–31.
3. **Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И.** Экспериментальное изучение влияния вихревой пелены от малого препятствия на отрывное течение в каверне // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 723–730.
4. **Neumann J., Wengle H.** DNS and LES of passively controlled turbulent backward facing step flow // Flow, Turbulence and Combustion. 2003. Vol. 71. P. 297–309.
5. **Neumann J., Wengle H.** Coherent structures in controlled separated flow over sharp-edged and rounded steps // J. of Turbulence. 2004. Vol. 5, No. 22. 14 p.
6. **Miau J.J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H.** Control of separated flow by a two-dimensional oscillating fence // AIAA J. 1991. Vol. 29. P. 1140–1148.
7. **Isomoto K., Honami S.** The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment processes over a backward facing step // Trans. JSME. 1988. Vol. 54B. P. 51–58.
8. **Bogatko T.V., Dyachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I.** Control of heat transfer in separated flows with the help of mini turbulators // Proc. of 14th Int. Heat Trans. Conf., IHTC14-22153, Washington, D.C.: Hemisphere Publishing. 2010. Vol. 2. P. 303–309.
9. **Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И.** Тепловые и динамические особенности пассивно управляемых турбулентных отрывных течений в поперечной каверне // Тр. 5-ой Росс. нац. конф. по теплообмену (РНКТ-5), Москва, 25–29 октября 2010. М.: МЭИ, 2010. Т. 2. С. 111–114.
10. **Терехов В.И., Смольский Я.И., Шаров К.А.** Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 3. С. 46–53.
11. **Дьяченко А.Ю., Смольский Я.И., Терехов В.И., Ярыгина Н.И.** Эффективные интенсификаторы турбулентного теплообмена в отрывных течениях за уступом // Тр. 6-ой Росс. нац. конф. по теплообмену (РНКТ-6), Москва, 25–29 октября 2014. М.: МЭИ, 2014. С. 8–18.
12. **Богатко Т.В.** Влияние отрывных зон на вихреобразование и турбулентный теплообмен в круглой трубе: дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.14. 2013. 28 с.
13. **Ahn J., Lee J. S.** Large eddy simulation of flow and heat transfer in a channel with a detached rib arrays // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. P. 445–452.
14. **Changcharoen W., Eiamsa-ard S.** Numerical investigation of turbulent heat transfer in channels with detached rib-arrays // Heat Transfer—Asian Research. 2011. Vol. 40, No. 5. P. 431–447.
15. **Angele K., Grewe F.** Instantaneous behavior of streamwise vortices for turbulent boundary layer separation control // J. Fluids Eng. 2007. Vol. 129. P. 226–235.
16. **Pujals G., Depardon S., Cossu C.** Transient growth of coherent streaks for control of turbulent flow separation // Intern. J. of Aerodynamics. 2011. Vol. 41, No. 3/4. P. 318–336.
17. **Терехов В.И., Богатко Т.В.** Структура отрывного течения и теплообмен при турбулентном обтекании отсоединенной диафрагмы в круглой трубе // Тепловые процессы в технике. 2015. № 2. С. 57–66.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2015 г.,  
после доработки — 15 апреля 2015 г.