

УДК 536.24

Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов*

А.Ю. Дьяченко¹, В.Л. Жданов², Я.И. Смутьский¹, В.И. Терехов¹

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

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, Минск, Беларусь

E-mails: terekhov@itp.nsc.ru, valery.zhdanov@hmti.ac.by

Представлены результаты экспериментального исследования распределения статического давления и теплообмена в отрывном течении за обратным уступом при наличии вихрегенераторов. Генераторы продольных вихрей (табы) представляют собой выступы прямоугольной формы, размер которых, шаг между ними и местоположение в экспериментах варьировались. Результаты экспериментов сравнивались с двумя предельными случаями: в первом рассматривался гладкий уступ в отсутствие табов, во втором — промежуток между табами отсутствовал и преграда представляла собой сплошное ребро. Наибольшее влияние на течение и теплообмен табы оказывают в рециркуляционной зоне, непосредственно примыкающей к основанию уступа. Табы, установленные на краю уступа, значительно сокращают координату максимального значения числа Нуссельта, что и обуславливает эффект интенсификации локальной и средней теплоотдачи.

Ключевые слова: турбулентный поток, отрывное течение, табы, обратный уступ, теплообмен.

Введение

Экспериментальному изучению тепломассопереноса в отрывных течениях за обратной прямоугольной ступенькой (уступом) посвящено большое количество работ [1–4]. Эта задача к настоящему времени стала классической, но интерес к ней не ослабевает в силу недостаточно полного исследования трехмерного поля течения и сложного теплообмена. Более подробно этот вопрос обсуждался в ряде обзоров и монографий [5–7]. Другой важной причиной, стимулирующей развитие данного направления науки, является поиск методов управления теплообменом в отрывных потоках. Работы, ориентированные на решение этих задач, широко востребованы практическими приложениями и в настоящее время остаются актуальными.

Среди активных методов управления характеристиками отрывного течения наибольшее распространение получили различные способы внесения в поток контролируемых периодических возмущений разной природы [8–10]. В этих и других многочисленных работах данного направления показано, что за счет изменения амплитуды и частоты

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-58-00011) и средств Минобрнауки РФ (гос. рег. № АААА-А17-117030310010-9).

возмущений можно как интенсифицировать, так и подавлять тепломассоотдачу от поверхности. Схожие по природе явления наблюдаются и в естественно или искусственно формируемых высокотурбулентных [4, 11] и пульсирующих [12] потоках. Значительного усиления (подавления) процесса переноса можно достигнуть путем локального вдува или отсоса газа в окрестности точки отрыва [13], а также пористым подводом (отводом) массы к поверхности, к которой присоединяется оторвавшееся течение [14]. Визуализация течения за осциллирующим ребром, расположенным перед обратной ступенькой, была выполнена в работе [15]. Было установлено, что в зависимости от соотношения масштабов двух отрывных зон — за ребром и ступенькой, а также местоположения ребра и частоты осцилляций возможно существование большого разнообразия картин течения. При этом изменения масштабов отрывных зон, интенсивности рециркуляции жидкости в них и, соответственно, теплообмена и уровня гидравлических потерь могут быть значительными.

Активные методы управления течением позволяют плавно регулировать интенсивность циркуляционного течения и размеры области, в которой оно происходит после отрыва, однако их практическое применение существенно затруднено. Вследствие этого пассивные методы управления предпочтительнее в силу их технологичности и простоты реализации. Наличие дополнительных элементов (поперечных ребер, генераторов вихрей и др.) с существенно меньшими размерами по сравнению с масштабами основного потока может приводить к значительной перестройке течения. Вихревая пелена, генерируемая минитурбулизатором, взаимодействует с крупномасштабными структурами сдвигового слоя, при этом в зависимости от положения турбулизатора и соотношения масштабов двух отрывных потоков могут быть реализованы различные сценарии течения.

Перестройка течения за уступом за счет пассивного управления течением изучалась в экспериментальных и численных работах [15–18]. В них в качестве минитурбулизатора использовалось тонкое ребро, высота которого была значительно меньше размера уступа. В работах [19, 20] проводилось подробное экспериментальное исследование влияния высоты двумерной преграды и места её установки на процессы аэродинамики и теплопереноса при отрыве потока за обратной ступенькой.

В экспериментах [21] использовалась проницаемая минипреграда. Было показано, что наличие щелей в преграде за счет дополнительного вихреобразования разрушает отрывной пузырь и снижает уровень разрежения в рециркуляционной области. Также было отмечено, что величина площади, занятой щелями, заметно сказывается на распределении давления, в то время как ее влияние на максимальный теплообмен оказалось минимальным. Был сделан вывод, что форма преград, их размер и местоположение изменяют структуру отрывного течения и характер тепломассопереноса.

Влияние вихрегенераторов на теплообмен в пограничном слое на твердой стенке и в затопленных струях изучалось достаточно основательно [5, 22, 23], тогда как исследований их воздействия на отрывное течение практически не проводилось. Авторами обнаружена единственная экспериментальная работа [24], в которой исследовалось влияние установленных на кромке уступа зубцов (табов) на динамические характеристики течения за уступом и поле статического давления на поверхности за точкой отрыва потока. Было определено оптимальное соотношение размеров табов и шага между ними, при которых рециркуляционная область сокращается практически в два раза.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния высоты минипреграды в виде табов, плотности их установки и местоположения на интенсивность процесса теплопереноса и поля давлений при отрыве потока за обратным уступом.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в канале с прямоугольным сечением размером 20×150 мм, длиной 1 м (рис. 1), выполненном из листа текстолита толщиной 10 мм. На расстоянии 600 мм от входа в канал находился обратный уступ с постоянной высотой $H = 10$ мм

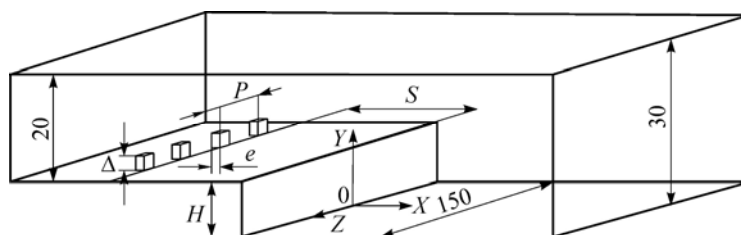


Рис. 1. Схема рабочего участка.

в поперечном потоку направлении. На нижней стенке канала за обратным уступом размещался тепловой участок длиной 400 мм. На слой текстолита был наклеен ленточный нагреватель из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм, который обеспечивал постоянный тепловой поток на поверхности. Для уменьшения тепловых потерь на внешнюю поверхность листа текстолита наклеивался слой экструдированного пенополистирола толщиной 20 мм. Вдоль центральной линии нагреваемой поверхности под ленточным нагревателем были вмонтированы 80 хромель-копелевых термопар. Расстояния между соседними термопарами различались: вблизи обратного уступа они составляли 2,5 мм, а в конце модели — 20 мм. Для оценки утечек тепла на внешней поверхности текстолитовой пластины в модель были вмонтированы три термопары. При обработке данных учитывалось излучение алюминиевой фольги, которое в рассматриваемом случае составляло менее 1 % от конвективного теплообмена. В работе [13] отмечалось, что сложность учета поперечных и продольных утечек тепла в окрестности уступа не позволяет проводить корректные измерения в этой области, поэтому результаты измерений на расстоянии от уступа, равном 10 мм, при обработке не использовались.

Вихревые генераторы (табы) имели квадратную форму высотой $\Delta = 3$ и 6 мм и были выполнены из оргстекла толщиной $e = 3$ мм. Расстояние между табами P изменялось от 12,5 до 75 мм, а их число n варьировалось от 1 до 9. Всего было изучено 9 геометрий, и в таблице представлен перечень исследованных табов с их характеристиками. В качестве предельных случаев рассматривались обтекание гладкого уступа (№ 1) и уступа с установленным перед ним сплошным ребром (№ 2 и № 3). При этом табы, как и сплошные ребра, могли располагаться на различных расстояниях S от кромки уступа, и эта величина варьировалась в диапазоне от 0 до 40 мм. Число Рейнольдса $Re = UH/\nu$, рассчитанное по высоте уступа H и среднерасходной скорости U , было неизменным и составляло 4000. Средняя температура потока воздуха составляла 21 ± 1 °С. На расстоянии от входа, равном 25 высотам (калибрам) уступа (уступ находился на расстоянии 30 калибров), пограничные слои сомкнулись, и профиль скорости стал близок к степенному с показателем степени $n \approx 1/7$.

Таблица

Геометрии исследованных в работе преград

№	Рабочий участок	Обозначение	Δ , мм	Шаг между табами, P , мм	P/H	Число табов, n
1	Гладкий уступ	●	0	–	–	–
2	Сплошное ребро	▲	3	0	0	0
3	Сплошное ребро	■	6	0	0	0
4	Табы	○	3	75	7,5	1
5	Табы	▽	3	50	5	2
6	Табы	□	3	25	2,5	5
7	Табы	☆	3	12,5	1,25	9
8	Табы	⦿	6	50	5	2
9	Табы	■	6	25	2,5	5

Температура стенки измерялась тепловизором THERMO TRACER TH7102 IR Imager (Япония) со спектральным диапазоном 8–14 мкм. Оцифровка полученного поля температур проводилась минимум по двум термопарам, а построение термограмм и визуализация теплового поля выполнялись с использованием специальных компьютерных программ, приложенных к данному тепловизору фирмой-производителем. Локальный коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле $\alpha = q / (T_w - T_0)$, где q — тепловой поток, измеряемый на нагреваемой стенке модели за уступом за вычетом тепловых утечек, T_w — температура нагреваемой стенки, T_0 — температура потока в канале перед уступом. Число Нуссельта определялось как

$$\text{Nu} = \alpha H / \lambda,$$

где α — коэффициент теплоотдачи, λ — теплопроводность воздуха, определяемая по температуре воздушного потока. Максимальная неопределенность измерения коэффициента теплоотдачи в настоящем эксперименте, так же как и в опытах [20], не превышала 5 %.

Для отбора статического давления была изготовлена стенка из оргстекла с отверстиями диаметром 0,8 мм, которые располагались в двух направлениях: продольный ряд с 49 отверстиями — по центру модели и поперечный ряд с 15 равномерно расположенными отверстиями — на расстоянии 40 мм от уступа. В продольном ряду расстояния между отверстиями сгущались от точки присоединения потока до основания уступа, и минимальное значение составило 5 мм. Измерения проводились с помощью дифференциального группового наклонного микроманометра с неопределенностью, не превышающей 5 Па. Коэффициенты давления рассчитывались по формуле $C_p = 2(p_i - p_0) / \rho U^2$, где p_0 — статическое давление на расстоянии 160 мм до уступа.

Результаты экспериментов

Коэффициенты давления

Результаты измерения коэффициентов давления по длине канала при различных расстояниях S от места установки табов до кромки уступа вдоль центра симметрии модели приведены на рис. 2. Здесь же для сравнения представлены данные для гладкого уступа (режим № 1). Установка вихрегенератора не приводит к качественному изменению характера кривой. Вблизи уступа наблюдается разрежение с последующим восстановлением давления на расстояниях X/H , составляющих около 20 калибров по высоте уступа. Распределение давления за табами с $\Delta = 3$ мм, расположенными с шагом $P = 75$ и 50 мм (рис. 2а), мало отличается от распределения для гладкого уступа. С уменьшением расстояния между табами, например при $S = 25$ мм (режим № 6), вблизи уступа происходит понижение давления по сравнению со случаем гладкого уступа. Более частое расположение табов (например, $S = 12,5$ мм, режим № 7), приводит к общему падению полного давления, вследствие чего кривая профиля C_p для этих условий находится ниже, чем для гладкого случая.

Как и ожидалось, более высокие табы оказывают большее влияние на величину давления на стенке. Это видно из рис. 2б, где демонстрируется распределение давления при установке табов высотой $\Delta = 6$ мм в зависимости от их местоположения до кромки уступа ($S/H = 0, 2$ и 4) при плотностях установки $P/H = 2,5$ и 5. Наибольшее разрежение в зоне рециркуляции отрывного потока наблюдается в случае расположения табов на кромке уступа ($S/H = 0$) и при самом частом их расположении ($P/H = 2,5$, режим № 9). При этом снижение коэффициента давления по сравнению с уступом без возмущений может достигать пяти раз. Восстановление давления, как и для гладкого случая, происходит примерно на 20 калибрах. Уменьшение количества зубцов вызывает увеличение

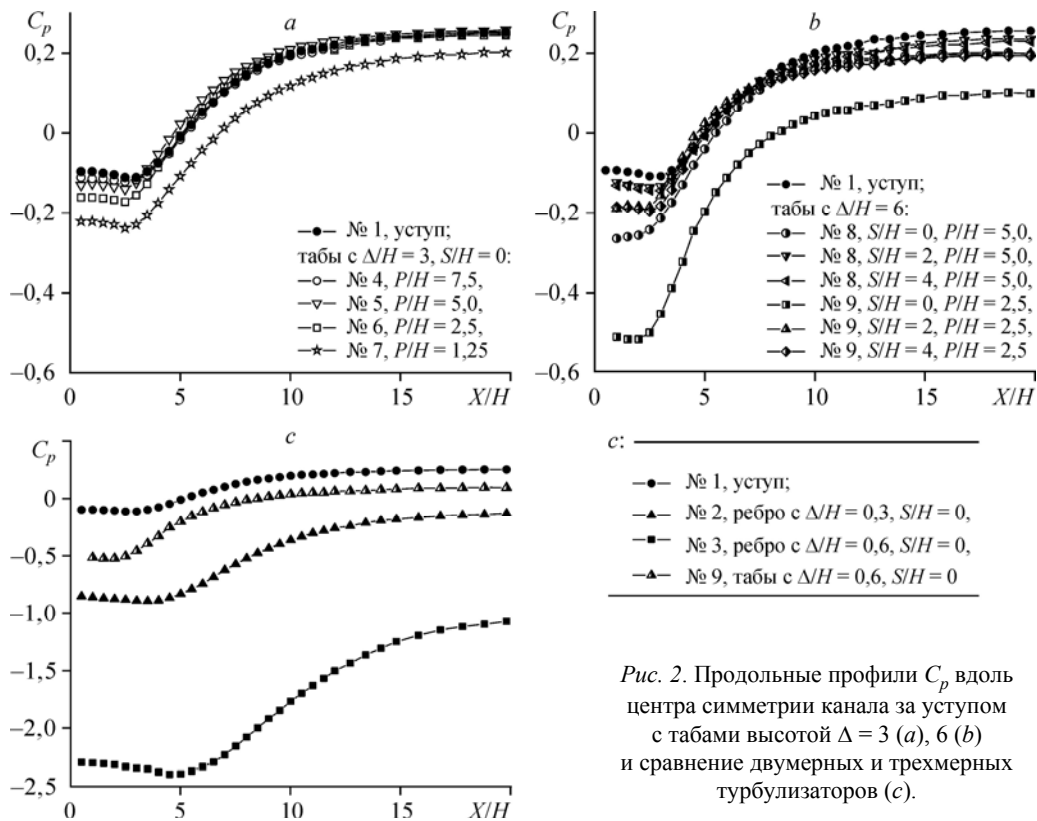


Рис. 2. Продольные профили C_p вдоль центра симметрии канала за уступом с табами высотой $\Delta = 3$ (a), 6 (b) и сравнение двумерных и трехмерных турбулизаторов (c).

коэффициента давления C_p . Таким же образом воздействует и увеличение расстояния от места установки табов до уступа S . Это происходит за счет ослабления вносимых в отрывной поток возмущений, что в результате приводит к постепенному сближению результатов с данными измерений для гладкого уступа. Следует отметить, что данные для табов одного размера, установленных на одном и том же расстоянии ($S/H = 2$ и 4), мало отличаются друг от друга, особенно за область присоединения оторвавшегося потока $X/H > 5$.

Представляет интерес сравнение данных по давлению за табами со случаем использования сплошных двумерных турбулизаторов — ребер [19]. Такое сопоставление приведено на рис. 2с. Сплошные ребра, как это наглядно следует из рисунка, оказывают более сильное влияние на характер распределения давления и его величину. Следует отметить, что минимум давления для сплошных ребер заметно смещается вниз по потоку, когда для случая с табами, наоборот, эта зона сильно сокращается. Аналогичное влияние табов отмечалось в работе [24], тогда как для двумерных преград, как это было показано в исследовании [19], область присоединения отодвигается от уступа, причем максимальный эффект достигается в случаях, когда двумерный турбулизатор находится на кромке уступа. Это же заключение можно отнести к координате $X_{C_{pmin}}$: область присоединения для двумерной преграды высотой $\Delta = 3$ мм отодвинулась на 3,5, а для $\Delta = 6$ мм — более чем на 4 калибра.

Распределение коэффициента давления поперек канала в сечении $X/H = 4$ демонстрируется на рис. 3. Все представленные здесь режимы полностью соответствуют такому же на рис. 2, где изображены данные для продольного распределения C_p . Если табы невысокие ($\Delta/H = 0.3$, рис. 3a) и располагаются нечасто ($P/H > 1.5$), то все опытные точки группируются вблизи данных для гладкого уступа. Исключение составляет случай с частным расположением табов ($P/H = 1.25$), когда уровень разрежения возрастает

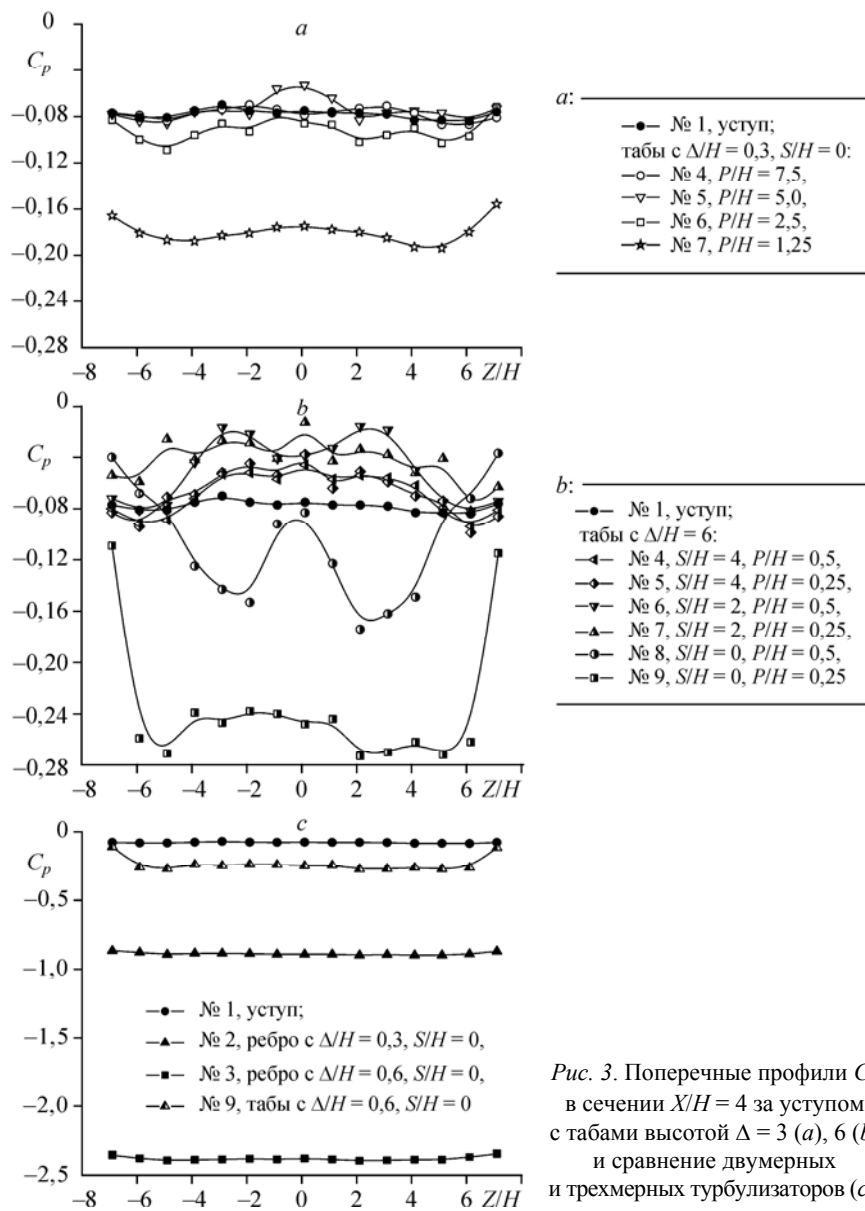


Рис. 3. Поперечные профили C_p в сечении $X/H = 4$ за уступом с табами высотой $\Delta = 3$ (a), 6 (b) и сравнение двумерных и трехмерных турбулизаторов (c).

практически вдвое. При этом распределения носят немонотонный характер, и влияние следа, образующегося за каждым препятствием, хоть и в слабой мере, но все-таки проявляется. Более сильное воздействие на поле давления оказывают высокие табы ($\Delta/H = 0,6$, рис. 3b), приводя к более сильной неравномерности течения в трансверсальном направлении. Здесь четко прослеживается след за каждым из табов и общее воздействие на величину разрежения.

Для двумерных преград поле давления вдали от точки отрыва, как правило, является равномерным в поперечном направлении [5, 19]. Об этом свидетельствуют и полученные в настоящей работе опытные данные (рис. 3c). Высота преграды сказывается преимущественно на общем уровне разрежения, а для табов можно отметить заметные изменения только в непосредственной окрестности боковых стенок канала.

Термографическая визуализация и теплообмен

Результаты термографической визуализации температурного поля в области взаимодействия отрывного течения со стенкой канала представлены на рис. 4. Здесь показаны данные для гладкого уступа (рис. 4a), для случая установки сплошного ребра на краю уступа высотой $\Delta/H = 0,6$ (рис. 4b) и при наличии табов высотой $\Delta/H = 0,6$, расположенных с шагом $P/H = 2,5$ (рис. 4c). В первом случае за кромкой уступа в центральной зоне формируется застойная область, хорошо просматриваемая также с помощью сажемасляной визуализации [4]. На термограмме (рис. 4a) ей соответствует наиболее нагретая зона. Более холодная зона находится в области присоединения. Нагретая область расширяется при установке ребра на краю уступа (рис. 4b) вследствие увеличения рециркуляционной области. Область присоединения потока является более протяженной по длине. Все указанные особенности влияния микротурбулизатора на теплообмен отмечались в работах [19, 20]. Табы, установленные на кромке уступа (рис. 4c), изменяют структуру теплового поля так, что практически полностью ликвидируется подавление теплообмена в застойной рециркуляционной зоне за уступом. Это является положительным свойством табов, которое приводит к улучшению теплообмена в плохо продуваемой застойной области. Кроме того, на рис. 4c прослеживается чередование нагретых и охлажденных полос, вызванных продольными вихрями за табами.

Опытные данные по распределению локальной теплоотдачи вдоль течения от точки отрыва, осредненные по всей ширине канала, демонстрируются на рис. 5. Табы небольшой высоты ($\Delta/H = 0,3$) оказывают слабое влияние на теплоотдачу по сравнению со случаем без табов, при этом интенсификация теплообмена, согласно данным рис. 5a, не превышает 10 %. Процесс теплообмена для высоких табов ($\Delta/H = 0,6$, рис. 5b) принципиально отличается от случая отрыва за гладким уступом. Наиболее сильное изменение наблюдается в зоне формирования отрывного пузыря ($X/H < 6$), где табы, разрушая его, тем самым интенсифицируют теплоотдачу. Это наиболее значимый эффект, который может быть использован в технических приложениях.

Сравнение с двумерными преградами приведено на рис. 5c. Оно позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, двумерные преграды, установленные непосредственно на кромке уступа, заметно интенсифицируют теплообмен (до 50 %) по всей длине модели. Во-вторых, как это видно из рисунка, при использовании табов теплообмен сильно интенсифицируется в области между точкой отрыва и до повторного присоединения ($0 < X/H < 6$). И наконец, в этом случае наблюдается более быстрая релаксация теплообмена до уровня невозмущенного течения.

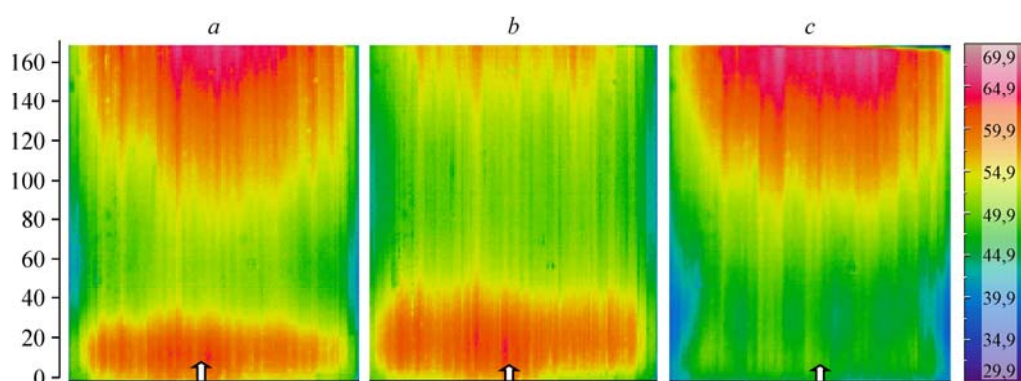


Рис. 4. Термограммы за расширением канала для гладкого уступа (a), для уступа со сплошным ребром высотой 6 мм (b) и с табами высотой 6 мм с шагом $P = 25$ мм между ними (c).

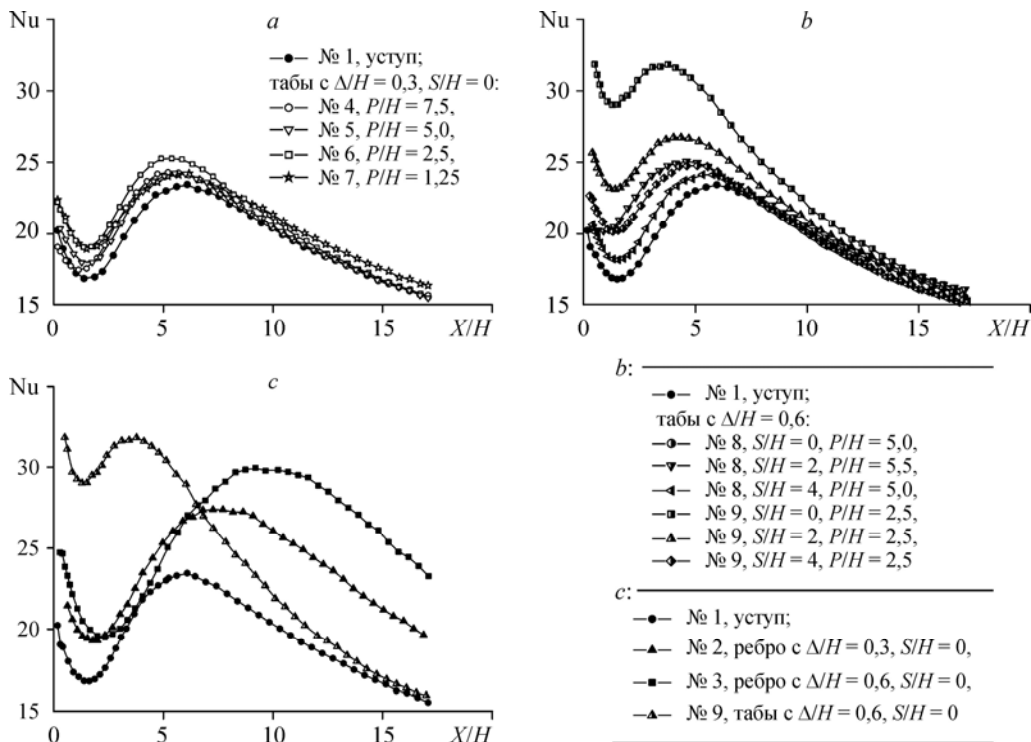


Рис. 5. Распределение локального числа Nu за уступом с табами высотой $\Delta/H = 3$ (a), 6 (b) и сравнение двумерных и трехмерных турбулизаторов (c).

Более детально поведение характерных масштабов теплообмена в отрывных потоках, а именно: величины максимального числа Нуссельта Nu_{\max} и координаты его местоположения, можно проанализировать по данным, представленным на рис. 6. Общий вывод, следующий из рис. 6a, где показано изменение максимального числа Нуссельта, заключается в том, что это число слабо зависит от типа преграды. Для двумерного сплошного ребра и трехмерного таба это отличие не превышает 20 %, причем при установке преград на кромке уступа ($S/\Delta = 0$) табы дают более высокое значение Nu_{\max} по сравнению с двумерной преградой (ребром). Возмущения, вносимые табами, быстрее затухают по мере продвижения их от кромки уступа навстречу потоку, в результате чего величина Nu_{\max} на рис. 6a снижается быстрее, чем при использовании ребер. Таким образом, при больших удалениях от точки отрыва крупномасштабные возмущения от преград ослабевают, а в пределе $S/\Delta \rightarrow \infty$ исчезают вовсе, и далее тепловая картина будет соответствовать случаю обтекания гладкого уступа. О наличии такого перехода свидетельствует опытная точка, полученная для уступа без преград, обозначенная на рис. 6a как режим № 1.

Основная особенность воздействия табов на отрывное течение заключается в значительном сокращении продольного масштаба отрывного пузыря, что приводит к смещению координаты Nu_{\max} к кромке уступа. Это наглядно следует из рис. 6b, где представлено изменение величины X_{\max}/H для всех изученных в работе дву- и трехмерных преград. Если для уступа при отсутствии возмущений эта величина близка к классическим данным — $X_{\max}/H \approx 6$ [2, 3, 5], то для табов обнаружено ее снижение до $X_{\max}/H < 4$. Такая ситуация наблюдается для случая $S/\Delta = 0$, когда табы оказывают максимальное воздействие на отрывное течение и разрушают его. По мере ослабления вихревой пелены отрывной пузырь вновь восстанавливается так, что его продольный размер стремится к невозмущенной величине $X_{\max}/H \rightarrow 6$.

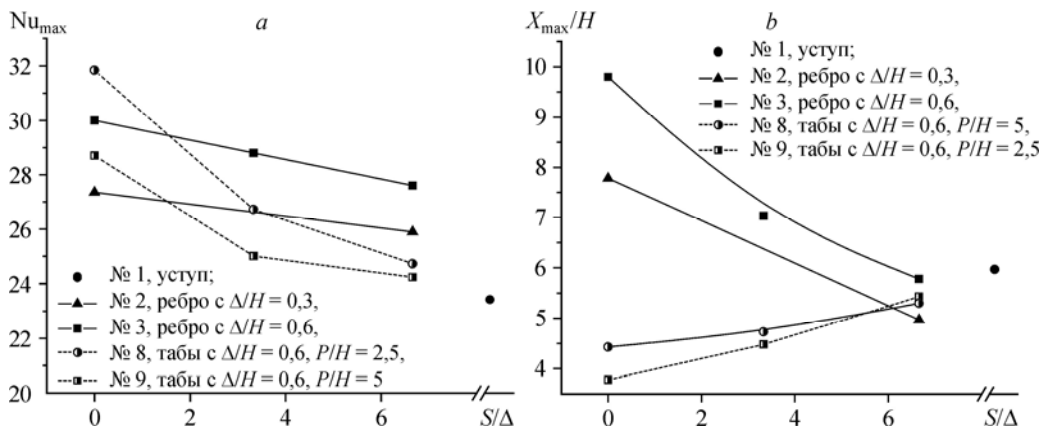


Рис. 6. Изменение максимального значения числа Нуссельта Nu_{\max} (a) и координаты его положения X_{\max} (b) при различных удалениях преград от кромки уступа S/Δ .

Для двумерных преград — ребер — наблюдается обратная картина. Действительно, в этом случае длина отрывной зоны возрастает практически в 3 раза по сравнению со случаем с использованием табов. Это наглядно следует из рис. 6b. Только при большом удалении ребер от кромки, с которой происходит отрыв потока, размер отрывной зоны сокращается до величины, соответствующей обтеканию гладкого уступа.

Таким образом, главным эффектом воздействия табов на течение и теплообмен при отрыве потока за прямоугольной ступенькой является интенсивное сокращение плохо продуваемой области застойного течения. В то же время уровень максимального теплообмена при наличии табов не снижается, а, напротив, возрастает. Это свойство табов может быть с успехом использовано для интенсификации теплообмена.

Величину эффекта интенсификации теплообмена может наглядно характеризовать значение интегрального числа Нуссельта \overline{Nu} , которое определяет осредненный коэффициент теплоотдачи на заданной длине участка теплообмена. На рис. 7 представлены среднеинтегральные значения \overline{Nu} , вычисленные по формуле

$$\overline{Nu} = \frac{1}{X} \int_0^X Nu \, dX. \quad (2)$$

Распределения среднего числа Нуссельта заметно отличаются от поведения локального теплообмена вдоль пластины. Это следует из сопоставления данных рис. 5 и 7. Для интегральной теплоотдачи характерными являются более пологие максимумы, и достигаются они на более далеких расстояниях от точки отрыва, нежели локальная теплоотдача.

Максимальный эффект интенсификации среднего теплообмена дают часто расположенные табы (точки № 9, $P/H = 2,5$ на рис. 7), установленные на краю уступа ($S/H = 0,0$). Из рисунка видно, что среднее число Нуссельта \overline{Nu} может увеличиваться более чем на 50%. Основной причиной усиления теплообмена, как это отмечалось выше, является разрушение застойной зоны крупномасштабными вихревыми структурами, генерируемые табами.

Важно отметить, что при использовании табов, зона повышенного теплообмена является протяженной и, как правило, составляет 5–10 калибров по высоте уступа. Это означает, что процесс организации интенсивного теплообмена на протяженных поверхностях за счет отрыва потока с использованием табов значительно упрощается.

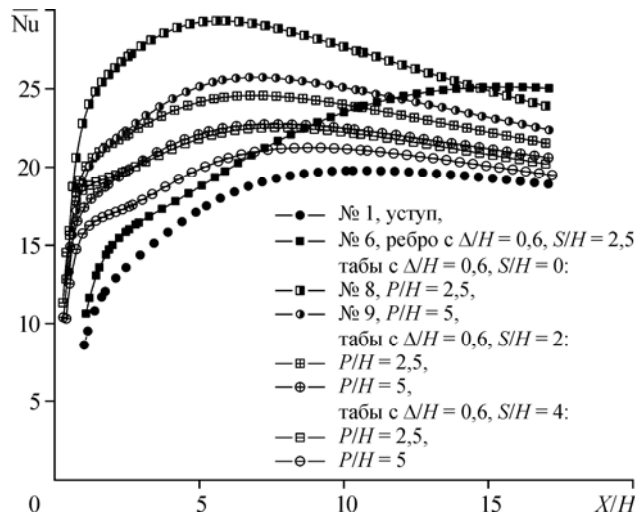


Рис. 7. Среднее число Нуссельта \overline{Nu} при установке двумерных преград и табов.

Если в качестве турбулизирующего элемента использовать двумерное сплошное ребро такой же высоты, то средняя теплоотдача практически на всей протяженности пластины получается всюду ниже, чем за табами. Совпадение этих величин достигается только в дальнем следе рециркуляционной области отрывного течения при $X/H \approx 15$. Если табы смещаются от точки отрыва навстречу потоку, то все отмеченные особенности распределения средней теплоотдачи подобны предельному случаю $S/H = 0$, за тем лишь исключением, что абсолютные значения чисел \overline{Nu} снижаются по мере удаления от кромки уступа. При этом следует подчеркнуть, что, судя по данным рис. 7, местоположением табов можно изменять интегральный теплоперенос в широких пределах. Сильно сказывается на теплоотдаче также размер табов и плотность их установки. Это свидетельствует о больших потенциальных возможностях табов для интенсификации теплообмена, а в более широком смысле для пассивного управления процессом теплопереноса.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование распределения давления и теплообмена за обратным уступом в случае пассивного управления с помощью минитурбулизатора с числом Рейнольдса $Re = 4000$. Установлено, что табы высотой $\Delta/H = 0,3$ оказывают слабое влияние на теплообмен, тогда как влияние высоких табов — $\Delta/H = 0,6$ — становится значительным. При этом основное изменение тепловой картины наблюдается вблизи основания уступа, где происходит интенсивное разрушение отрывного пузыря за счет крупномасштабных продольных вихрей, генерируемых табами. Этот эффект является основной причиной сокращения отрывной области за уступом и интенсификации локальной и средней теплоотдачи. Установлено, что в сравнении с базовым случаем обтекания гладкого уступа наибольшее значение Nu_{max} приходится на случай с табами, установленными с наименьшим шагом ($P/H = 1,25$). Причем более высокие преграды в своем классе (ребро, табы) сильнее интенсифицируют теплоотдачу, а с увеличением расстояния S от преграды до точки отрыва рециркуляционная область при наличии табов растет, тогда как в случаях с ребром, наоборот, падает. Это говорит о различии механизмов формирования крупномасштабных турбулентных структур с дву- и трехмерными преградами, что в свою очередь требует более детальных исследований тонкой структуры течения и механизмов взаимодействия отрывных потоков с различными масштабами.

Список обозначений

H — высота уступа,	X — продольная координата,
e — толщина ребра,	Y — поперечная координата,
S — расстояние от ребра до уступа,	α — коэффициент теплоотдачи,
Δ — высота ребра,	$Nu = \alpha \cdot H / \lambda$ — локальное число Нуссельта,
Re — число Рейнольдса, рассчитанное по высоте уступа H и среднерасходной скорости,	$\overline{Nu} = 1/X \int_0^X Nu dX$ — интегральное число Нуссельта.
X_r — координата точки присоединения потока,	

Список литературы

1. Себан Р.А. Теплоотдача в турбулентном сорванном потоке воздуха за уступом в поверхности пластины // Теплопередача. Сер. С. 1964. Т. 86, № 2. С. 154–161.
2. Vogel J.C., Eaton J.K. Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 1985. Vol. 107, No. 4. P. 922–929.
3. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Жданов Р.Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром. Ч. 2. Теплообмен в отрывном течении // Прикл. механ. и технич. физика. 2003. Т. 44, № 4. С. 83–94.
4. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 4535–4551.
5. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смутьский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 239 с.
6. Isaev S.A., Leontiev A.I., Chudnovsky Y., Popov I.A. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. Vol. 25, No. 6. P. 579–604.
7. Simpson R.L. Turbulent boundary — layer separation // Ann. Rev. Fluid Mech. 1989. Vol. 21. P. 205–234.
8. Chun K.B., Sung H.J. Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing // Exp. in Fluids. 1996. Vol. 21 P. 417–426.
9. Saric S., Jakirlic S., Tropea C. A periodically perturbed backward-facing step flow by means of LES, DES and T-RANS: an example of flow separation control // Trans. ASME J. Fluid Eng. 2005. Vol. 127. P. 879–887.
10. Yoshioka Sh., Obi Sh., Masuda Sh. Turbulence statistics of periodically perturbed separated flow over backward-facing step // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2001. No. 22. P. 393–401.
11. 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.
12. Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Молочников В.М. Отрыв пульсирующего потока // Докл. АН. 2007. Т. 417, № 6. С. 760–763.
13. Sano M., Suzuki I., Sakuraba K. Control of turbulent channel flow over a backward-facing step by suction // J. Fluid Sci. and Technol. 2009. Vol. 4, No. 1. P. 188–199.
14. Терехов В.В., Терехов В.И. Влияние поперечного потока на структуру отрывного турбулентного течения и теплообмен за обратным уступом // Прикл. механ. и технич. физика. 2017. Т. 58, № 2. С. 78–89.
15. Miao 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.
16. Neumann J., Wengle H. DNS and LES of passively controlled backward-facing step flow // Flow, Turbulence and Combustion 2003. Vol. 71. P. 297–310.
17. Neumann J. On time-dependent behavior of controlled turbulent flow with separation and reattachment // Proc. Appl. Math. Mech. 2003. No. 3. P. 44–47.
18. Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А. Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления // Письма в ЖТФ. 2012. № 3. С. 46–53.
19. Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А. Экспериментальное исследование структуры течения при взаимодействии двух отрывных потоков различных масштабов // Прикл. механ. и технич. физика. 2016. Т. 57, № 1. С. 207–215.
20. Терехов В.И., Смутьский Я.И. Экспериментальное исследование теплообмена при взаимодействии двух отрывных потоков различного масштаба // Прикл. мех. и технич. физика. 2015. Т. 56, № 5. С. 156–164.
21. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смутьский Я.И., Терехов В.И. Управление отрывным потоком за уступом с помощью разрезных ребер // Инж.-физ. журн. 2017. Т. 90, № 3. С. 575–583.

22. **Jacobi A.M., Shah R.K.** Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: a review of recent progress // *Exp. Thermal Fluid Sci.* 1995. Vol. 11, No. 3. P. 295–309.
23. **Zaman K.B.M.Q., Reeder M.F., Samimy M.** Control of an axisymmetric jet using vortex generators // *Phys. Fluids*. 1994. Vol. 6, Iss. 2. P. 778–793.
24. **Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y.** Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // *Phys. Fluids*. 2007. Vol. 19, No. 10. P. 105103-1–105103-12.

*Статья поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.,
после доработки — 9 ноября 2018 г.,
принята к публикации 11 декабря 2018 г.*