

## Экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя при наличии в нем прямоугольного перфорированного выступа

© В.Н. Афанасьев, Дехай Кон, С.И. Гетя, В.Л. Трифонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Отрывные течения широко применяются в космической технике, авиации, газовых турбинах и др. Отрыв течения и его повторное присоединение могут служить мощным средством интенсификации теплообменных процессов, причем его организация достаточно проста и надежна в технологическом отношении.*

*Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики и теплообмена в отрывной зоне до и за одиночным прямоугольным перфорированным выступом, расположенным на плоской пластине, обогреваемой по закону  $q_{ст} = const$ . Экспериментальные измерения выполнены с использованием трубки Пито — Прандтля и термоанемометрического комплекса Dantec Dynatics, что позволило получить новые как средние, так и пульсационные характеристики турбулентного пограничного слоя. Проанализировано влияние степени перфорации выступа и расположения отверстий в нем на эффективность теплоотдачи. Установлено, что застойные и рециркуляционные зоны как перед перфорированными выступами, так и за ними смещаются, уменьшаются или исчезают. Исследования показали, что струйные потоки, падающие на поверхность теплообмена из отверстий перфорации за перфорированными выступами, обеспечивают увеличение теплоотдачи по сравнению со сплошными выступами.*

**Ключевые слова:** перфорированный выступ, экспериментальное исследование, турбулентный пограничный слой, отрывные течения, интенсификация теплообмена

**Введение.** Одной из главных задач современной теплоэнергетики является разработка и создание новых видов энергосистем и технологий, обеспечивающих значительное повышение производительности труда, экономию материальных ресурсов и охрану окружающей среды. Решение этой задачи требует использования высокоэффективных систем охлаждения и систем тепловой защиты, в которых применяются наиболее эффективные методы интенсификации процессов теплообмена. Одними из наиболее широко применяемых методов интенсификации теплообмена для теплоэнергетического оборудования являются формирование на исходно гладкой поверхности безотрывных и отрывных углублений-траншей или лунок [1–4] и использование присоединенных выступов на поверхности теплообмена [5–13].

Экспериментальные и теоретические исследования структуры течения при обтекании разного рода выступов и углублений на исходно гладких поверхностях представляют значительный практический интерес, поскольку углубления и полости конструктивного или случай-

ного происхождения встречаются на многих конвективных поверхностях, например, входящих в атмосферу космических летательных аппаратов, подвергающихся ударам микрометеоритов и аэродинамическому нагреву, каналов в турбинах, поверхностей оперения и т. п. При обтекании выступов и углублений отрыв пограничного слоя и его повторное присоединение приводят к возникновению специфических явлений, оказывающих существенное влияние на процессы сопротивления и теплообмена. Повторное присоединение потока — это сильный поперечный поток к поверхности за выступом (ребром), в общем случае он приводит к эффективному разрушению пограничного слоя и, следовательно, улучшению теплообмена.

Поскольку любая турбулизация потока связана с дополнительными затратами энергии, решающим при разработке эффективных методов интенсификации теплообмена является выбор места и способа дополнительной турбулизации потока. Наиболее эффективным был бы такой метод интенсификации, который бы обеспечил дополнительную турбулизацию только пристеночных слоев жидкости порядка  $y^+ \leq 30 \dots 100$ , не турбулизируя ядро пограничного слоя [7, 11, 12]. Можно ожидать, что именно такой метод интенсификации теплообмена обеспечит существенное увеличение коэффициента теплоотдачи при умеренном росте коэффициента сопротивления, т. е. обеспечит опережающий рост теплоотдачи над ростом сопротивления трения. Интерес представляют выступы, утопленные в пограничный слой или несколько превосходящие переходную область, которые не приводят к сильному увеличению сопротивления трения, а также к появлению сопротивления давления.

Кроме того, в случае сплошного выступа обычно возникают застойная зона перед выступом и зона рециркуляции непосредственно за выступом, приводящие к ухудшению теплоотдачи. Для преодоления этого недостатка предлагаются модифицированные выступы в виде так называемых перфорированных выступов [14–20]. В работе [15] исследован теплообмен в канале с перфорированными огражденными стенками и проведено сравнение с аналогичными стенками, но имеющими сплошные выступы. В работе [16] авторы исследовали интенсификацию теплообмена и перепад давления при течении в канале с перфорированными выступами прямоугольного поперечного сечения, установленными на плоской поверхности. Влияние угла наклона и положения отверстий (перфораций), диаметра и числа отверстий на коэффициент теплоотдачи в окрестности выступа рассмотрено в работах [17, 18]. Характеристики теплообмена в канале с различными перфорированными выступами исследованы в работе [19] с помощью ультракрасного сканирующего радиометра. Авторы работы [20] исследовали теплообмен и трение в прямоугольных тру-

бопроводах со сплошными или перфорированными выступами на плоской стенке. По сравнению со сплошными выступами большинство перфорированных выступов обеспечивает более эффективный теплообмен.

Цель данной работы — получение более подробной информации о процессах гидродинамики и теплообмена в окрестности перфорированного выступа для наглядного представления о физических процессах переноса в отрывных потоках. Кроме того, полученные данные можно использовать для инженерных оценок теплогидравлической эффективности различных интенсификаторов теплообмена. Экспериментально исследовали обтекание прямоугольных, перфорированных, квадратных выступов высотой примерно  $y^+ < 100$ , где  $y^+ = yu_\tau/\nu$  — безразмерное расстояние от стенки;  $u_\tau$  — динамическая скорость;  $\nu$  — кинематическая вязкость.

#### **Экспериментальная установка и методика эксперимента.**

Экспериментальную часть исследования выполняли на дозвуковой низкотурбулентной ( $\varepsilon = 0,2$  %) аэродинамической трубе открытого типа, работающей по принципу всасывания. Рабочая часть аэродинамической трубы представляет собой параллелепипед размером  $80 \times 300 \times 1100$  мм, на нижней стенке которого развивается исследуемый пограничный слой. Подробное описание методики эксперимента и экспериментальной установки приведено в работах [1, 3].

Все измерения были выполнены с помощью микрозонда Пито — Прандтля с микротермопарой, специально разработанного для работы в пограничном слое, и термоанемометрического комплекса Dantec Dynamics. Это позволило исследовать ламинарный подслой, переходную область пограничного слоя, а также получить, кроме средних характеристик течения, и пульсационные. Использование двух методов измерения обусловлено тем, что, как известно, термоанемометр при исследовании отрывных и возвратных течений принципиально не применим, так как это модульный датчик, который в зоне отрыва пограничного слоя, где средняя скорость течения изменяет направление движения (и знак), а пульсации имеют максимальные значения, может дать большую ошибку при определении средней скорости и существенно исказить пульсационные характеристики потока; кроме того, он не реагирует на изменение направления скорости.

Профили скорости (в невозвратных частях потока) и ее продольные пульсации в различных сечениях в пограничном слое измеряли с помощью одноточечного датчика (тип 55P11) с модулем Dantec Dynamics 90C10, являющимся термоанемометром постоянной температуры (СТА). Чувствительный элемент датчика — вольфрамовая нить длиной 1,25 мм и диаметром 5 мкм. Измерения температуры вы-

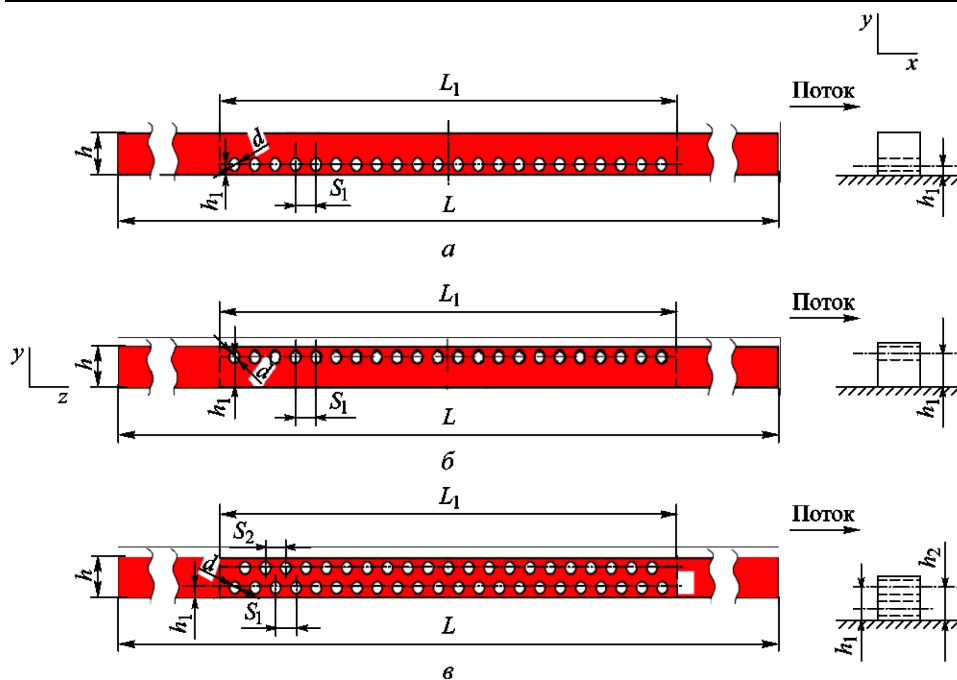
полнены с использованием температурного модуля Dantec Dynamics 90C20, являющегося термоанемометром постоянного тока (ССА). Блок включает в себя миниатюрный датчик с позолоченной вольфрамовой нитью (тип 55P04) диаметром 5 мкм и общей длиной 3 мм, который работает как термометр сопротивления. Для зондирования пограничного слоя используется система координатного устройства, которая содержит шаговый двигатель и блок питания, точность перемещения датчика координатным устройством порядка 0,02 мм.

Предельная относительная погрешность измерения скорости с использованием микроанометра МКВ-250 не превышает 1,2 %. Измерение напряжения сигнала в процессе эксперимента для истинных мгновенных значений скорости и температуры осуществляется с помощью 12-битной PCI-6040E карты National Instruments сбора данных и компьютерной программы Stream Ware. Оценка неопределенностей измерения теплогидравлических характеристик получена для 95 % доверительного интервала в соответствии с методом, приведенным в работах [21, 22]. Неопределенность средней скорости и температуры составила  $\pm 4$  % и  $\pm 3,6$  % соответственно. Неопределенность измерения среднеквадратичного значения продольных пульсаций скорости и температуры составила соответственно  $\pm 8$  % и  $\pm 7$  %.

Локальные коэффициенты трения определяли методом Клаузера [23] по логарифмической части скорости в пограничном слое и по наклону профиля скорости в ламинарном подслое, они построены по толщине потери импульса. Локальные коэффициенты теплоотдачи определяли по потере энергии и по наклону профиля температуры в ламинарном подслое. Неопределенность в определении относительных коэффициентов трения и теплоотдачи оценивалась соответственно  $\pm 15,2$  % и  $\pm 12,6$  %.

**Исследуемые поверхности.** Поперечные выступы квадратной формы с различной перфорацией высотой  $h = 3,2$  мм ( $\delta/h = 4,2$ , где  $\delta$  — толщина динамического пограничного слоя) устанавливали на нагреваемую нижнюю стенку канала перпендикулярно потоку на расстоянии 460 мм от входа в рабочий участок. Схемы установки выступов и их размеры приведены на рис. 1.

Скорость внешнего потока в первом сечении на расстоянии  $l_x = 425$  мм от входа в рабочую часть канала поддерживалась равной примерно 15,5 м/с, что соответствует числу Рейнольдса, рассчитанному по толщине потери импульса в этом сечении  $Re^{**} = 1492$ . Параметры исследуемых выступов приведены в таблице, в которой также даны значения пористости  $\phi$  рабочего участка ( $L_1$ ) выступа — отношение площади отверстий к полной боковой поверхности рабочего участка.



**Рис. 1.** Схемы прямоугольных перфорированных выступов на пластине: *а* — с перфорацией внизу (вариант *а*); *б* — с перфорацией сверху (вариант *б*); *в* — с шахматно расположенной перфорацией (вариант *в*)

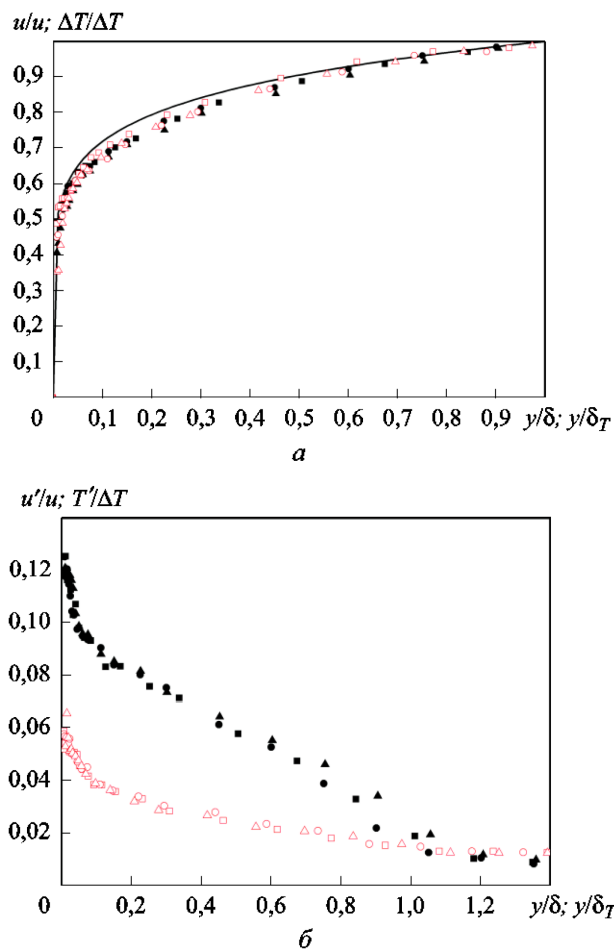
**Геометрические параметры исследуемых выступов**

Вариант	Расположение отверстий	Высота выступа $h$ , мм	Параметры отверстий					
			$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$S_1$ , мм	$S_2$ , мм	$d$ , мм	$\varphi$ , %
а	Нижнее	3,2	0,8	0	2	0	1,0	12
б	Верхнее	3,2	2,4	0	2	0	1,0	12
в	Шахматное	3,2	0,8	2,4	2	2	1,0	23,5

**Результаты экспериментального исследования.** В работе экспериментально исследовали средние и пульсационные динамические и тепловые характеристики отрывного течения при обтекании одиночного прямоугольного перфорированного выступа в турбулентном пограничном слое, формирующегося при обтекании потоком воздуха поверхности плоской пластины, обогреваемой по закону  $q_{ст} = const$ .

Совместное измерение распределений скорости и температуры и их пульсаций в турбулентном пограничном слое дает возможность количественно и качественно проанализировать и сопоставить теплообмен в различных областях пограничного слоя, включая вязкий подслой.

**Плоская пластина.** На рис. 2 приведены экспериментально определенные профили средних скоростей и их продольных пульсаций, температур и их пульсаций в трех сечениях на гладкой пластине до установки в этой области выступа. На рис. 2, а видно, что экспериментально полученные профили скорости и температуры в пограничном слое в сечениях 1–3 имеют вид, характерный для плоской стенки, а состояние пограничного слоя соответствует полностью развитому турбулентному пограничному слою. На это указывает и значение формпараметра в этих сечениях  $H = 1,35 \dots 1,37$ , т. е. профили практически совпадают с законом  $1/7$ .



**Рис. 2.** Распределение средней скорости  $u/u$  и температуры  $\Delta T/\Delta T$  (а) и их пульсаций  $u'/u$  и  $T'/\Delta T$  (б) в пограничном слое  $l_x$  в трех сечениях ( $l_x = 400, 450, 500$  мм):  
 1–3 — скорость; 4–6 — температура; — 7 — закон  $1/7$   
 ■ 1; ■ 2; ▲ 3; □ 4; □ 5; ▲ 6

Пульсации скорости и температуры в сечениях 1–3 (рис. 2, б) имеют вид, характерный для турбулентного пограничного слоя при безградиентном обтекании пластины. Аналогично данным работ [1, 7] наблюдается один ярко выраженный максимум у стенки при  $y/\delta \approx 0,02$ , т.е. источником порождения турбулентности является зона максимального градиента скорости и температуры у стенки.

Приведенные на рис. 3 значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи достаточно хорошо согласуются с известными законами трения и теплообмена [1, 3, 23, 24], что подтверждает надежность используемых методик определения трения и коэффициента теплоотдачи.

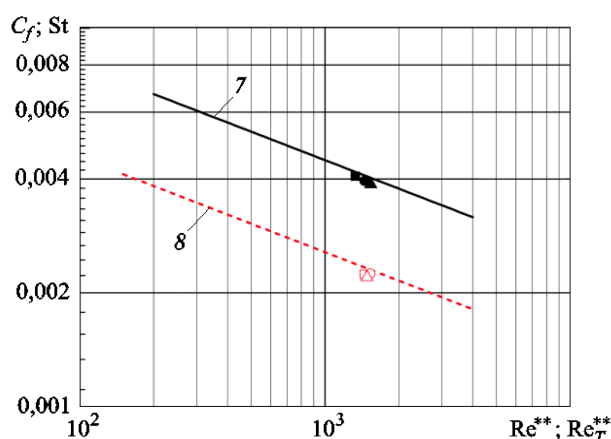


Рис. 3. Локальные коэффициенты трения ( $C_f$ ) и теплоотдачи ( $St$ ) на плоской пластине в трех сечениях:

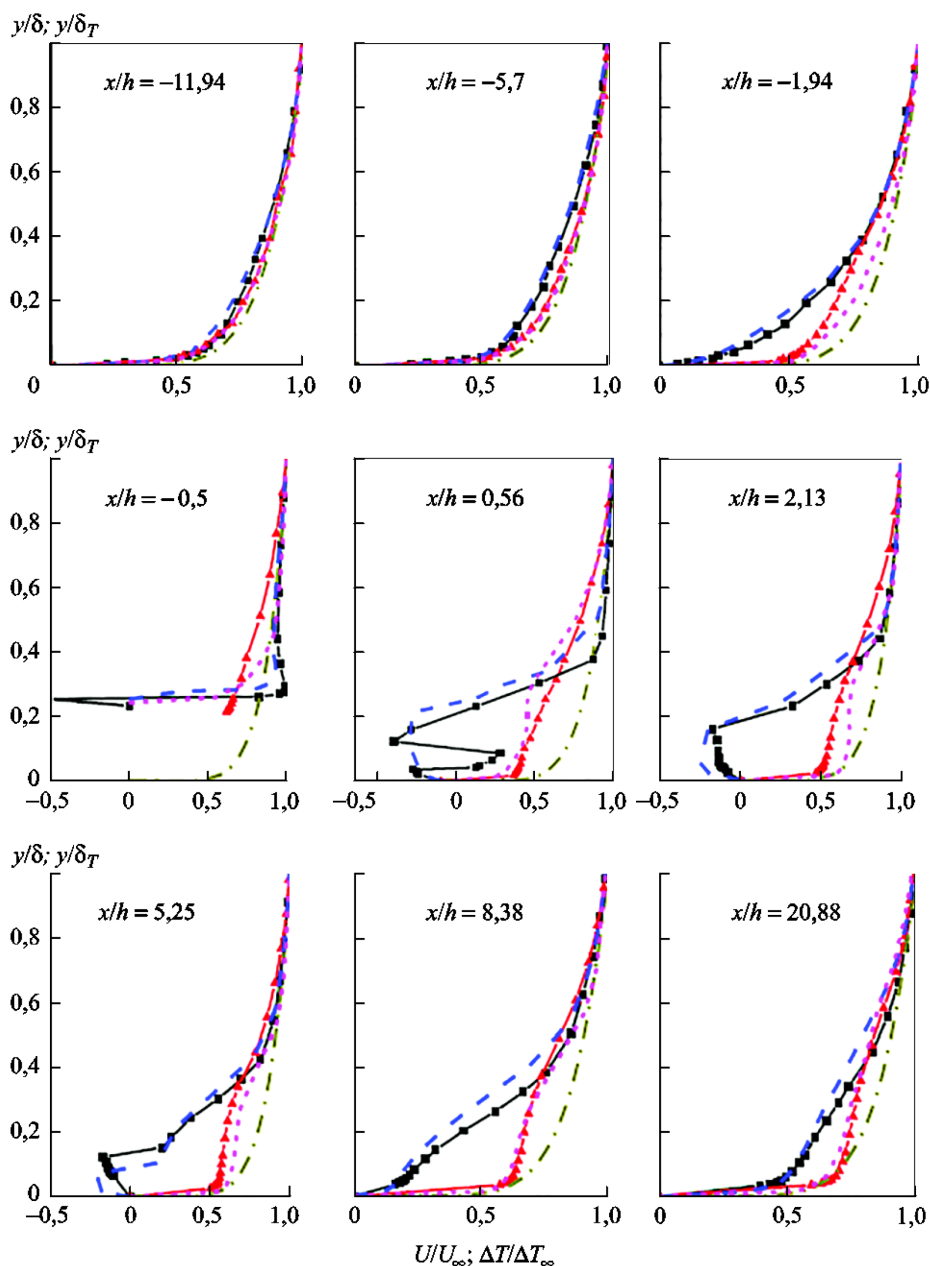
$$1-3 - C_f; 4-6 - St; 7 - C_f = 0,0252 (Re^{**})^{-0,25};$$

$$8 - St = 0,0144 (Re_T^{**})^{-0,25}$$

$$\blacksquare 1; \blacklozenge 2; \blacktriangle 3; \blacksquare 4; \blacklozenge 5; \blacktriangle 6$$

**Прямоугольный выступ с перфорацией внизу.** Структуру без градиентного турбулентного пограничного слоя экспериментально исследовали как перед прямоугольным выступом, так и за ним в диапазоне взаимного расположения выступа и сечений замера  $-11,94 < x/h < 20,88$ , где  $x$  — расстояние от задней стенки выступа до исследуемого сечения;  $h$  — высота выступа.

На рис. 4 представлены распределения скорости и температуры в пограничном слое в сечениях исследуемого интервала. Здесь же для сравнения приведены соответствующие данные для сплошного выступа [7]. Следует отметить, что значение и характер измеряемых параметров, в первую очередь скорости и ее пульсаций, зависят от числа отверстий, их расположения и расположения датчика относительно отверстий. Все это оказывает влияние на полученный результат. Из анализа результатов следует, что профили скорости, начиная с сечений 2 и 3 ( $x/h = -5,7$  и  $-1,94$ ), деформируются и становятся



**Рис. 4.** Распределения скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного внизу выступа:

1 —  $U/U_\infty$ ; 2 —  $\Delta T/\Delta T_\infty$ ; 3 — закон 1/7; сплошной выступ [7]; 4 —  $U/U_\infty$ ; 5 —  $\Delta T/\Delta T_\infty$

—■— 1; —▲— 2; - - -○- 3; - - -◇- 4; ····☆···· 5

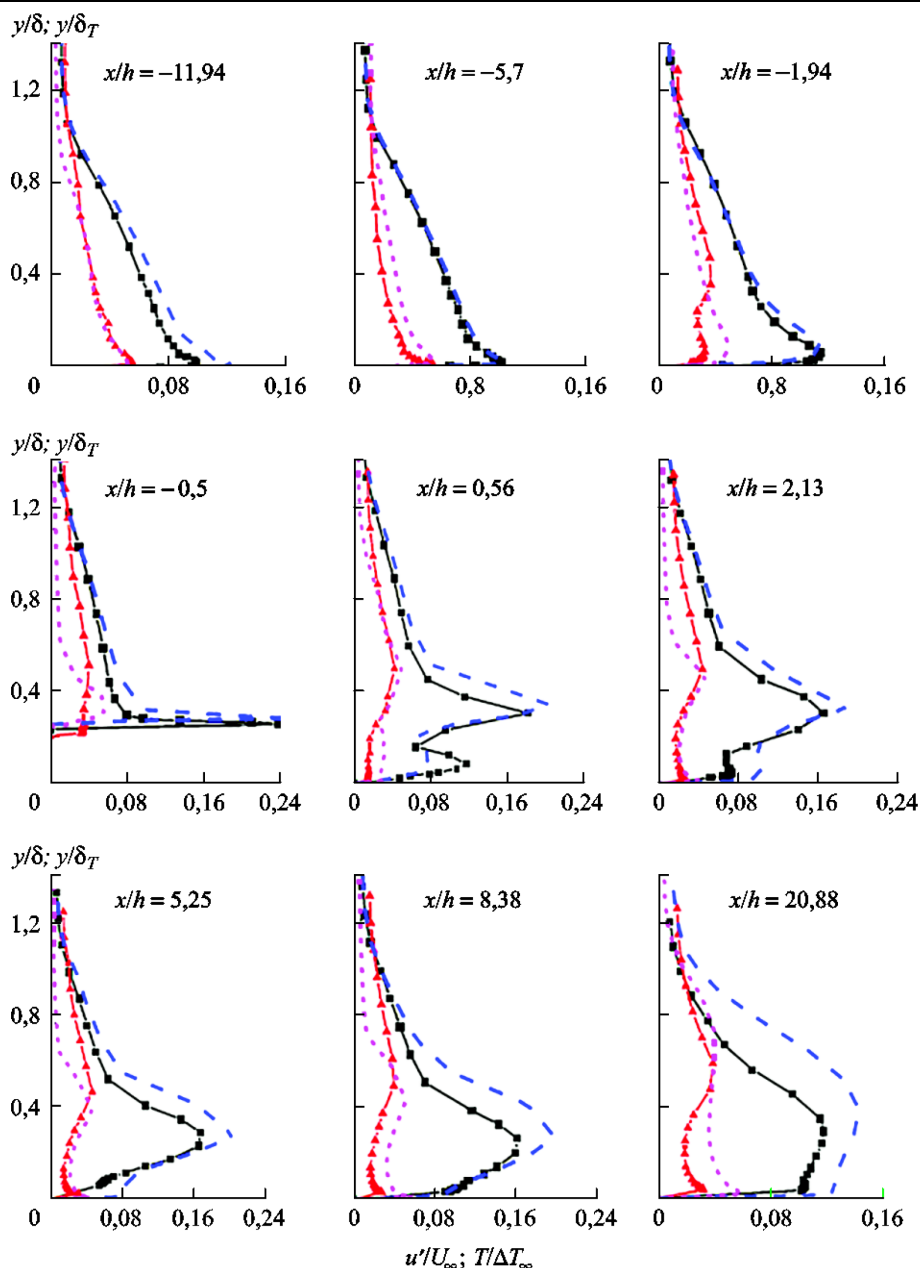
менее заполненными. Профили температуры слабо деформируются по сравнению со скоростью и незначительно отличаются от закона 1/7, т. е. они незначительно изменяют его форму, но непосредственно перед выступом (сечение 3,  $x/h = -1,94$ ) отмечается деформация профиля



температуры. В окрестности этого сечения перед выступом застойная зона у стенки в отличие от сплошного выступа [7] не наблюдается. В этом месте поток начинает перестраиваться, устремляется в отверстия в выступе и при определенных параметрах потока, выступа и его пористости исчезает застойная зона перед выступом, что приводит к улучшению условий теплоотдачи.

Резкое увеличение формпараметра  $H$  за выступом в сечениях 5 и 6 ( $H = 7,09$  и  $4,96$ ) указывает на наличие отрывной зоны — возвратного течения (рециркуляционной зоны). Очевидно, что размер и местоположение области рециркуляции существенно зависит от геометрии и параметров выступа и потока. Как известно [7], в случае сплошного выступа зона рециркуляции потока — это зона пониженной интенсивности теплоотдачи, появляющаяся сразу после выступа ( $0 \leq x/h \leq 6$ ). Присоединенный поток, который обеспечивает высокую интенсивность теплоотдачи, может наблюдаться в интервале  $x/h = 6 \dots 8$ . В данном исследовании это условие выполняется между сечениями 7 и 8 ( $5,25 \leq x/h \leq 8,38$ ). В точке встречи основного потока со стенкой начинает формироваться новый пограничный слой. Для прямоугольных перфорированных выступов зона рециркуляции практически совпала с соответствующей зоной за сплошным выступом [7], однако можно отметить небольшую тенденцию к смещению точки присоединения вниз по потоку. Это перемещение может быть вызвано струйным течением от перфорированного выступа, подаваемым из каждого отверстия. Причем с уменьшением расстояния перфораций (отверстий) от стенки и увеличения диаметра перфораций область рециркуляции должна удаляться дальше от выступа, т. е. должна смещаться вниз по потоку точка встречи потока и поверхности теплоотдачи. Данное исследование показывает, что рециркуляция может подавляться путем использования перфорированных выступов, т. е. высота выступа и пористость перфорации ( $\phi$ ) являются основными факторами, влияющими на размеры отрывной и рециркуляционной зон.

Распределение пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного внизу выступа представлено на рис. 5. Видно, что перед выступом практически во всех сечениях распределение пульсаций скорости и температуры качественно практически совпадает с соответствующими параметрами без градиентного обтекания сплошного выступа [7]. В сечении 4 над выступом распределения скорости, температуры и их пульсаций практически аналогичны для прямоугольного сплошного выступа. Следует отметить небольшое изменение пульсаций температуры в сечении 3 ( $x/h = -1,94$ ) — перед выступом на уровне центра отверстия (перфорации) в пульсациях температуры появился небольшой максимум, что не наблюдалось у сплошного выступа [7].



**Рис. 5.** Распределения пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного внизу выступа:

1 —  $u/U_\infty$ ; 2 —  $T/\Delta T_\infty$ ; сплошной выступ [7]; 3 —  $u/U_\infty$ ; 4 —  $T/\Delta T_\infty$   
 —●— 1; —■— 2; - - - 3; - - - 4

За выступом, как и в случае сплошного выступа [7], образуется сложное вихревое течение. На рис. 4 видно, что в области между сечениями 7 и 8 ( $5,25 < x/h < 8,38$ ) находится место присоединения основного потока к поверхности пластины, где поток разделяется на

две части: одна часть потока движется по направлению основного потока, и, начиная от точки присоединения в этой области, нарастает новый пограничный слой, в котором профиль скорости постепенно заполняется. Вторая часть потока, начиная от точки присоединения на расстоянии примерно  $x/h \approx 8,4 \dots 8,5$ , направляется обратно к выступу, навстречу основному потоку, формируя возвратное течение (точка присоединения в случае сплошного выступа находится на расстоянии  $x/h \approx 8,2 \dots 8,3$  [7]). В сечениях 5–8 ( $x/h < 8,38$ ) расположена зона отрыва, в которой наблюдается обратное движение вторичного потока в зону отрыва к задней стенке выступа, где вторичный поток, двигаясь к выступу, взаимодействует со встречным струйным течением, поступающим из перфорационных отверстий, оттесняется вверх и выбрасывается в основной поток, взаимодействуя с ним и образуя зону смешения — зону повышенной турбулентности, что особенно хорошо подтверждается распределением средней скорости и ее пульсаций в сечении 5 ( $x/h < 0,56$ ). Кроме того, это приводит к уменьшению зоны рециркуляции и смещению вниз по потоку точки присоединения основного потока к поверхности нагрева. Главное, что за выступом профили скорости существенно деформируются. Профиль температуры при этом практически не изменяется. В отличие от обтекания сплошного выступа [7] существенное изменение наблюдается в профиле скорости и ее пульсациях в сечении 5 ( $x/h = 0,56$ ) сразу за выступом, где имеет место ярко выраженный струйный вдув, который приводит к появлению резкого излома в профиле скорости, вызванного изменением направления движения потока на противоположное. Все это существенно влияет на профиль пульсаций скорости. Однако уже в следующем сечении 6 ( $x/h = 2,13$ ) вдув почти не ощущается. Профиль температуры и ее пульсации при этом практически не изменяются. Качественно механизм процессов, имеющих место в зоне возвратного течения (в области  $x/h < 8,0$ ), достаточно хорошо описан в работах [7, 8, 11].

В отрывной зоне существенное изменение претерпевают в первую очередь профили пульсации скорости и температуры (рис. 4, 5), на что указывает появление вторых максимумов в их распределении. В сечении 5 ( $x/h = 0,56$ ) в профиле скорости наблюдаются три излома и два максимума в профилях пульсаций скорости и температуры. Таким образом, за выступом в распределении пульсаций скорости имеется два источника порождения турбулентности: первый — поверхность теплообмена; второй — зона взаимодействия отрывавшегося основного потока от верхней поверхности выступа и вторичного потока за выступом. Причем порождение турбулентности (значение пульсаций скорости) в зоне смешения существенно превосходит интенсивность пристеночной турбулентности. У пульсаций температуры два слабо

выраженных максимума: у стенки и в зоне смешения. Из анализа профилей скорости следует, что второй излом профилей скорости совпадает с первым максимумом соответствующей пульсации в зоне взаимодействия струйного течения из отверстий перфорации и вторичного течения (см. рис. 4, 5, сечение 5); а третий излом профилей скорости совпадает со вторым максимумом соответствующей пульсации, который находится в зоне смешения. Аналогичное явление также наблюдается в профилях температуры и ее пульсаций, где первый излом профилей температуры совпадает с первым максимумом ее пульсации, а второй излом профилей температуры совпадает с ее вторым максимумом.

За выступом в зоне смешения (см. рис. 5) видно, что максимум пульсаций скорости существенно превосходит максимум пульсаций температуры, кроме того, в данном случае в сечении 5 первый максимум скорости существенно выше соответствующего максимума в случае сплошного выступа [7]. Это обусловлено большей деформацией профиля скорости, к которой приводит перфорируемый выступ. Все это значительно влияет на энергию турбулентности последующего потока, что хорошо демонстрирует распределение пульсаций скорости в последних сечениях 8 и 9 ( $x/h = 8,38$  и  $20,88$ ), где профили скорости и температуры практически приблизились к закону  $1/7$ , а пульсации скорости и температуры в этих сечениях имеют совершенно другой вид — они существенно выше, чем для соответствующих параметров при безградиентном обтекании, и их зона расширяется по мере удаления от выступа.

В данной работе представлено сравнение экспериментально полученных профилей скорости с ее распределением в универсальных логарифмических координатах (рис. 6):

$$u^+ = y^+ \quad \text{при } y^+ < 5; \quad (1)$$

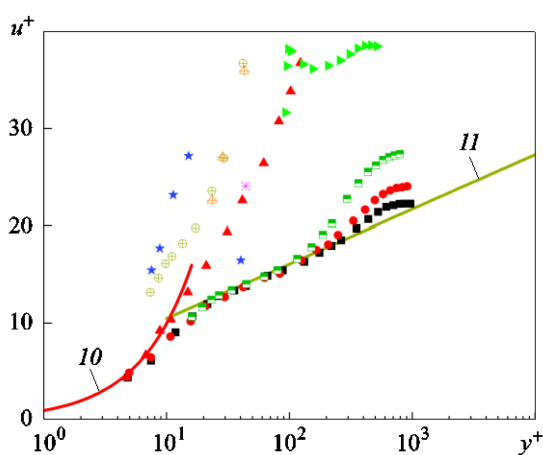
$$u^+ = 5,6 \lg y^+ + 4,9 \quad \text{при } y^+ > 30, \quad (2)$$

где  $u^+ = u/u_\tau$  — безразмерная скорость;  $y^+ = yu_\tau/\nu$  — безразмерная координата;  $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$  — динамическая скорость.

Такое представление профилей скорости в исследуемых сечениях дает возможность судить о состоянии пограничного слоя в данном сечении. Если полученные распределения скорости достаточно точно описываются универсальным законом, то течение в пограничном слое турбулентное и безградиентное.

Таким образом, по данным рис. 6 можно судить о степени воздействия турбулизатора (выступа) на пристеночную область пограничного слоя — в первую очередь на ламинарный подслой, буфер-

ную область и логарифмическую часть пограничного слоя. На рис. 6 видно, что в сечениях 1 и 2 профиль скорости практически еще не изменяется — наблюдается стандартный турбулентный пограничный слой. Кроме того, за сечением 8 ( $x/h = 8,38$ ) начинает формироваться стандартный турбулентный пограничный слой, а в сечении 9 ( $x/h = 20,88$ ) уже можно наблюдать появление достаточно большого прямого участка в логарифмической части турбулентного пограничного слоя, что позволяет использовать метод Клаузера для определения коэффициента сопротивления.



**Рис. 6.** Логарифмический профиль скорости в турбулентном пограничном слое для прямоугольного перфорированного внизу выступа:  
 1–9 —  $x/h = -11,94, -5,7, -1,94, -0,5, 0,56, 2,13, 5,25, 8,38, 20,88$ ; 10, 11 — расчет по сечениям 1, 2  
 ■ 1; ■ 2; ▲ 3; ▼ 4; ★ 5; ✖ 6; △ 7; □ 8; ■ 9

**Прямоугольный выступ с перфорацией сверху.** Аналогичные исследования проведены с прямоугольным перфорированным сверху выступом (см. рис. 1, б). Основные результаты экспериментов для девяти исследованных сечений приведены на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлены распределения скорости и температуры, на рис. 8 — распределения их пульсаций в пограничном слое в сечениях указанного интервала. Из сравнения рис. 4, 5 и 7, 8 следует, что профили скорости, температуры и их пульсаций практически совпадают.

Однако следует отметить существенное отличие в профилях скорости и ее пульсаций в сечениях 5 и 6 ( $x/h = 0,56$  и  $2,13$ ). Видно появление резких изломов в профиле скорости, что соответственно отражается и на пульсациях. В данном случае, как и в случае сплошного выступа, в отрывной зоне в профиле скорости наблюдаются два излома и два максимума в профилях пульсаций скорости и температуры. Видно, что точка присоединения потока к поверхности в данном

случае приблизилась к выступу по сравнению со случаем выступа с перфорацией внизу и находится перед сечением  $\delta$  ( $x/h = 8,0$ ), т. е. чем выше отстоит отверстие перфорации от стенки, тем ближе точка присоединения.

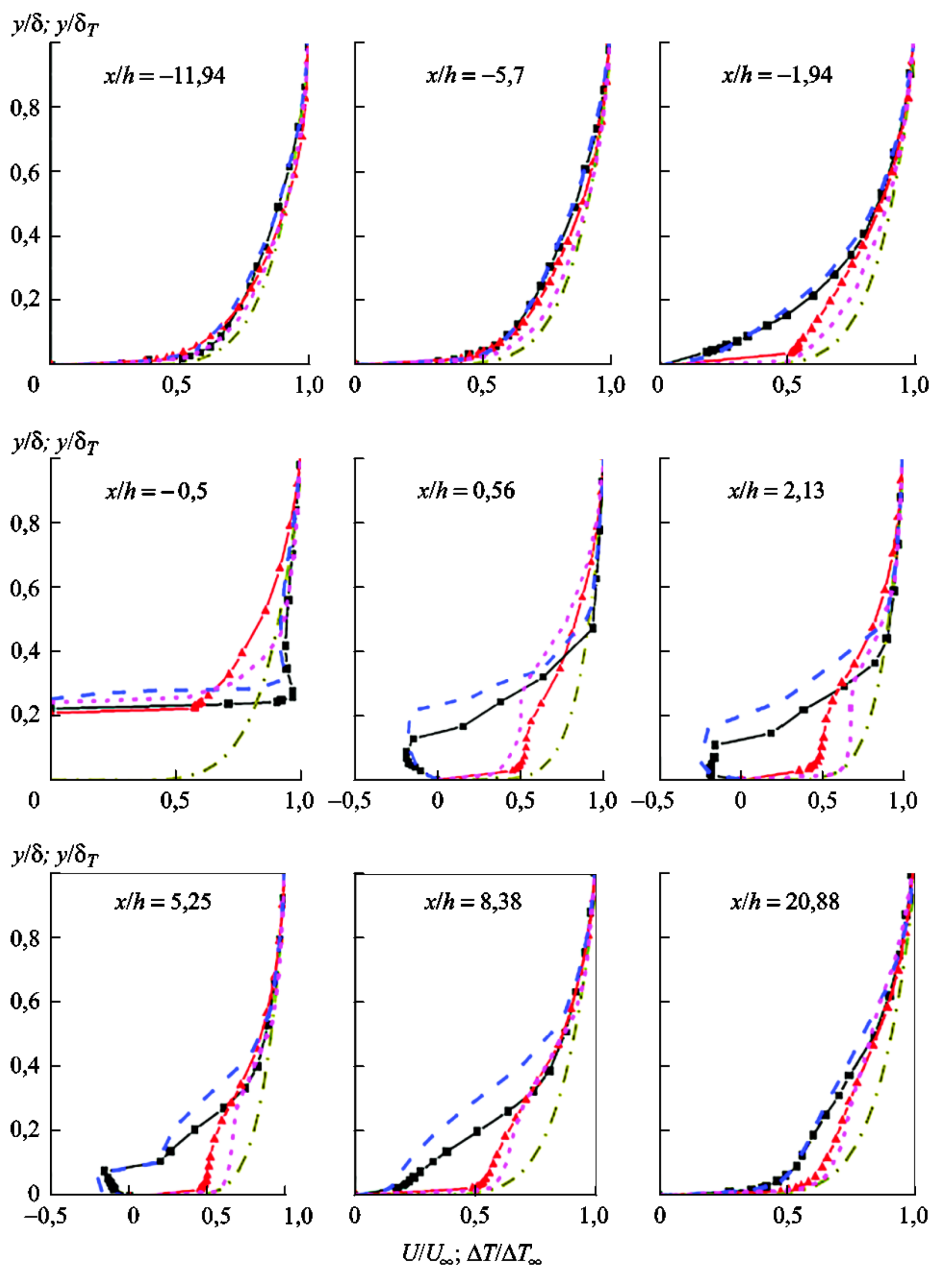


Рис. 7. Распределения скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного сверху выступа:

1–5 — см. обозначения на рис. 4

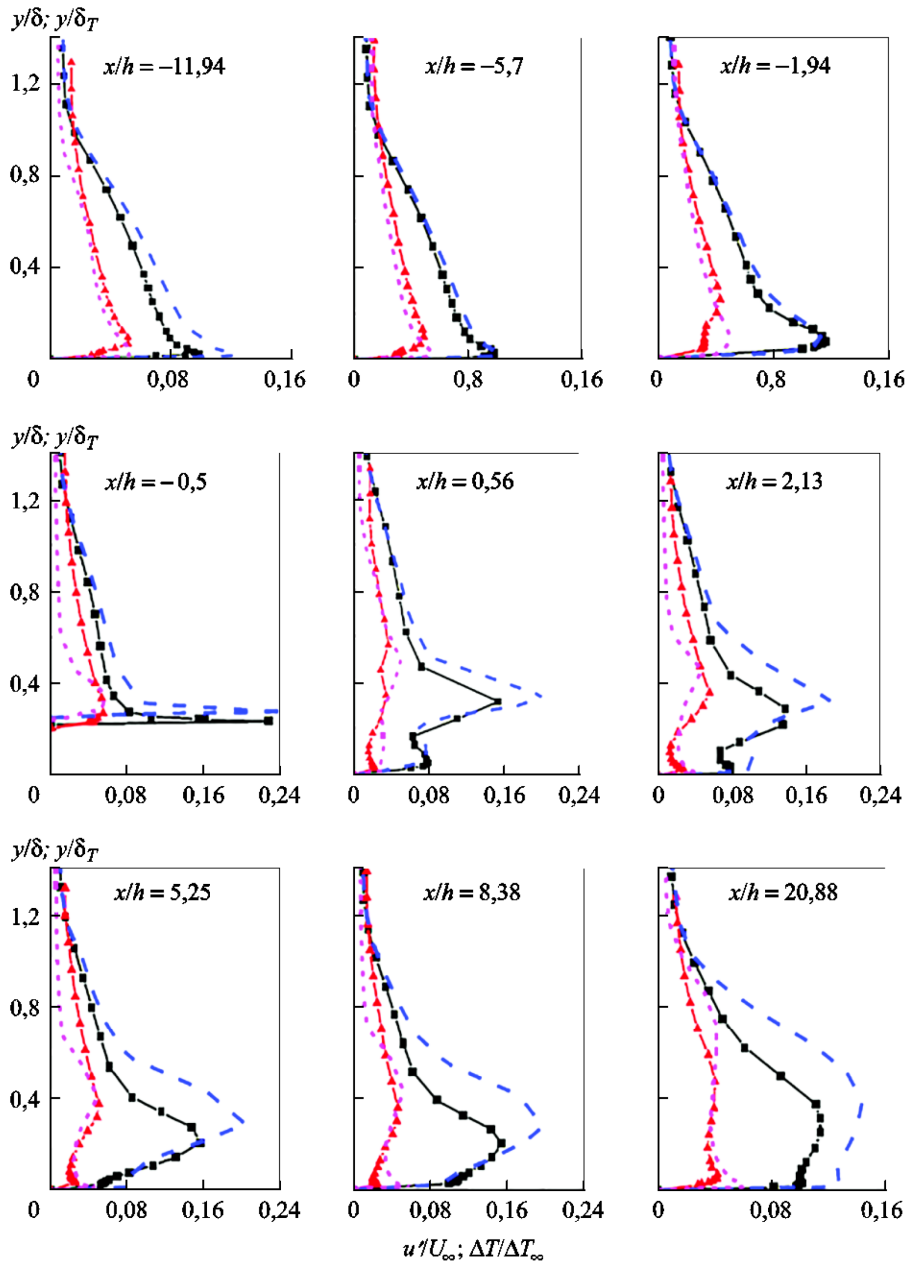
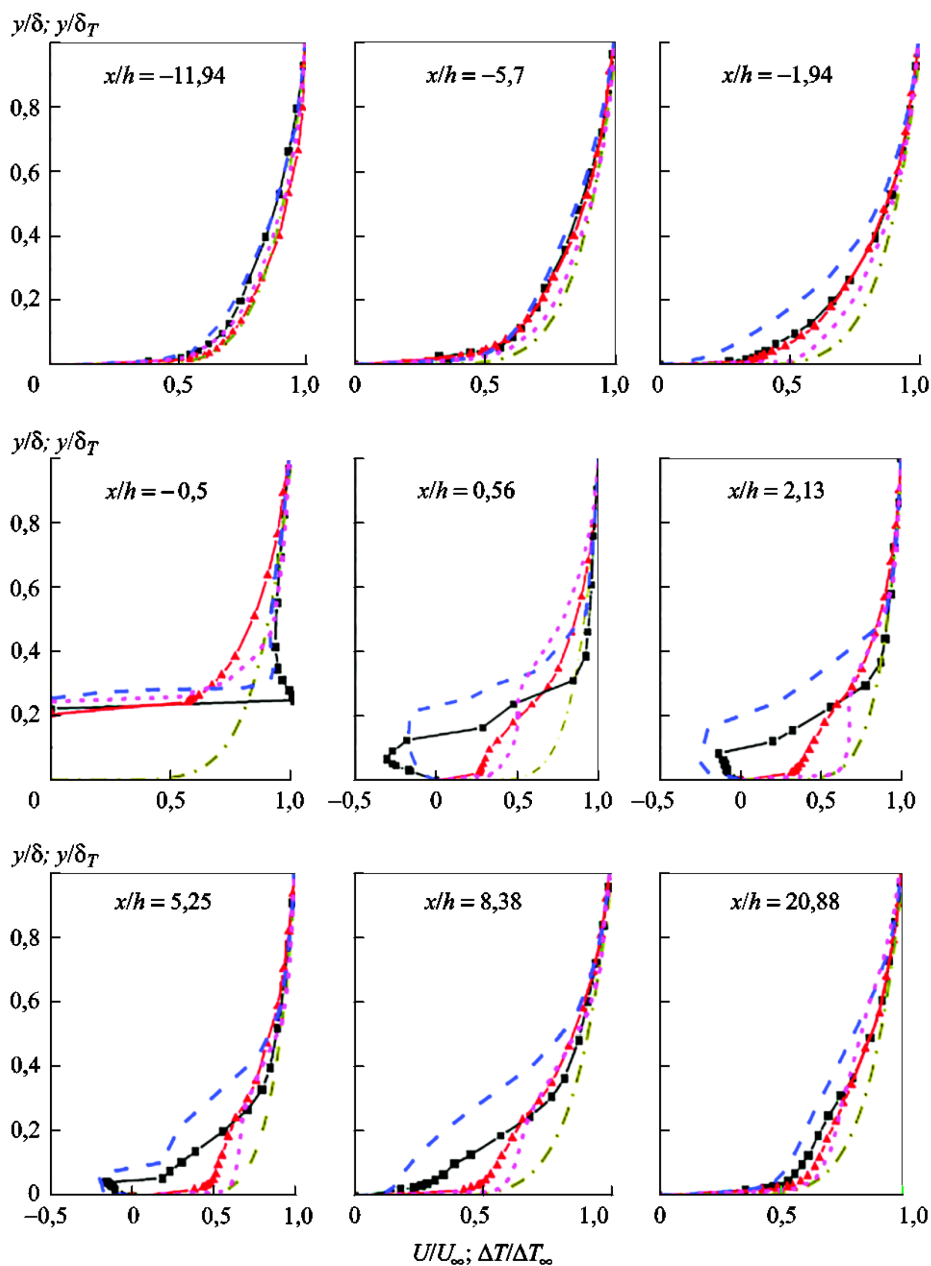


Рис. 8. Распределения пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного верху выступа:

1–4 — см. обозначения на рис. 5

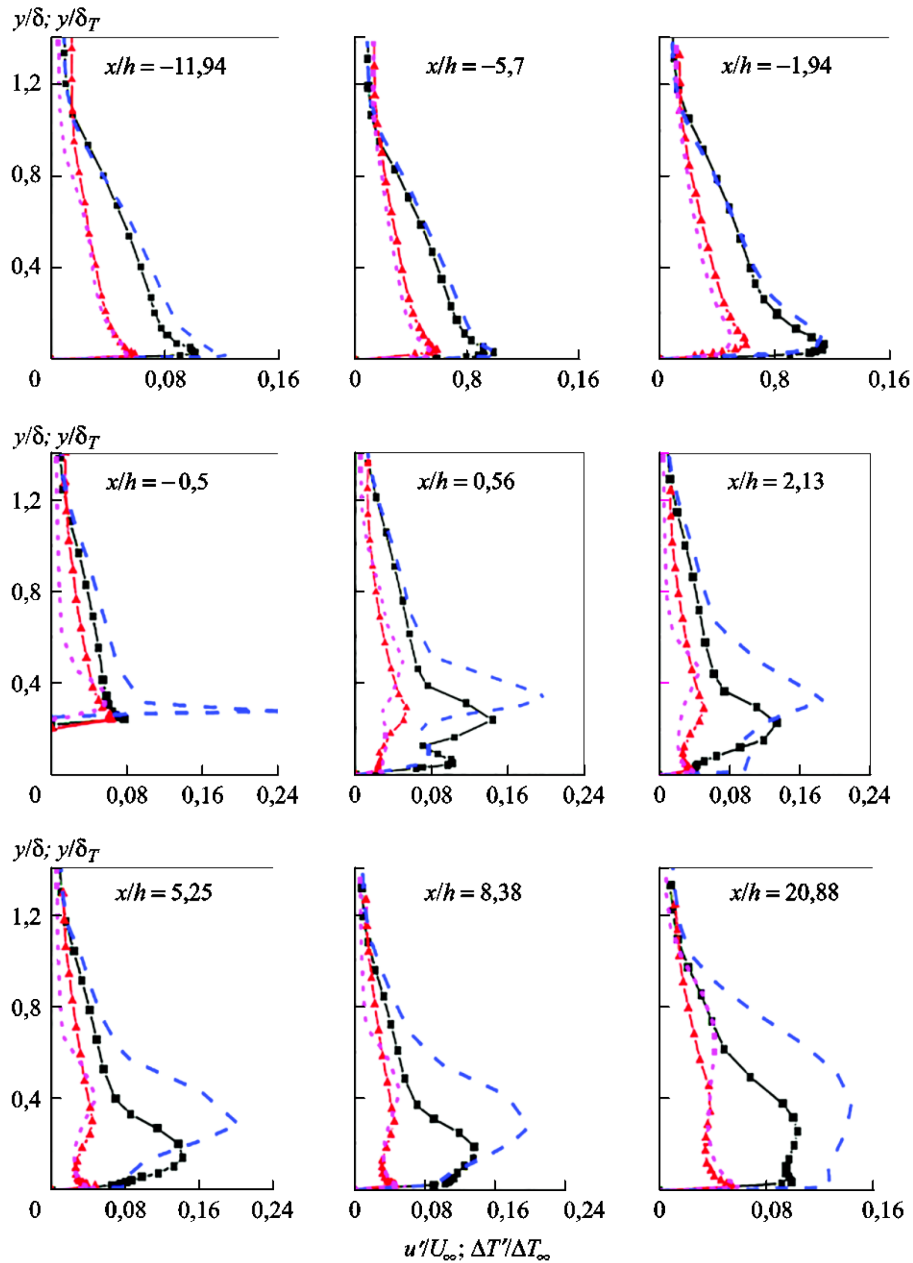
**Прямоугольный выступ с шахматным расположением отверстий.** Аналогичные исследования гидродинамики и теплообмена проведены в турбулентном пограничном слое с перфорированным прямоугольным выступом с шахматным расположением отверстий, т. е. в этом случае изменилась пористость выступа.

На рис. 9 представлены распределения скорости и температуры, на рис. 10 — распределения их пульсации в пограничном слое в сечениях указанного интервала.



**Рис. 9.** Распределения скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного выступа с шахматным расположением отверстий: 1–5 — см. обозначения на рис. 4





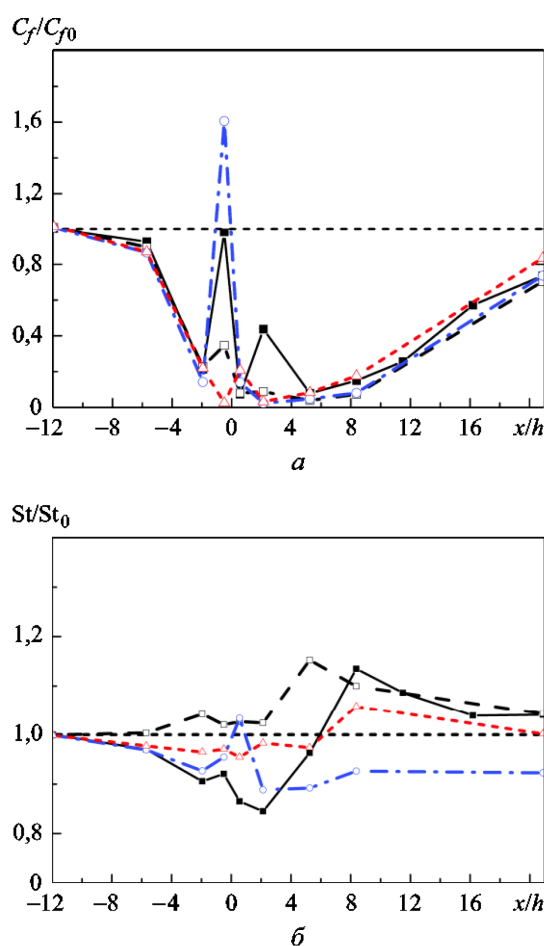
**Рис. 10.** Распределения пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного перфорированного выступа с шахматным расположением отверстий:  
1–4 — см. обозначения на рис. 5

Сравнение рис. 4, 5, 7–10 показало, что профили скорости, температуры и их пульсаций практически совпадают. Однако хорошо видно существенное отличие в профилях пульсаций в сечениях 5 и 6 ( $x/h = 0,56$  и  $2,13$ ), особенно в сечении 5. Видно появление резких изломов

в профиле пульсаций. Кроме того, точка присоединения сдвинулась вниз по потоку, как и в случае с выступом с перфорацией внизу.

При логарифмическом представлении профилей средней скорости для двух последних случаев видно их хорошее совпадение с профилями средней скорости прямоугольного перфорированного внизу выступа.

**Локальные распределения коэффициента трения и теплоотдачи.** На рис. 11 приведены значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи при турбулентном обтекании пластины с прямоугольными перфорированными выступами. В сечениях 1–2 и 9, где



**Рис. 11.** Локальные относительные коэффициенты трения (*a*) и теплоотдачи (*б*) на поверхности пластины с прямоугольными перфорированными выступами:

1–3 — варианты *a*, *б* и *в* соответственно; 4 — сплошной выступ [7]; 5 — плоская пластина — 1;  
 —○— 2; —△— 3; —■— 4; — 5

в профиле скорости имеет место логарифмический участок, локальные коэффициенты трения определяли по логарифмической части скорости в пограничном слое (метод Клаузера [23]) и по наклону профиля скорости в ламинарном подслое (закон Ньютона). Локальные коэффициенты теплоотдачи определяли по потере энергии, наклону профиля температуры в ламинарном подслое (закон Био — Фурье), а также по универсальному закону распределения температуры в турбулентном пограничном слое.

Из анализа рис. 11, *а* следует, что практически во всех рассмотренных случаях локальные относительные коэффициенты трения на поверхности пластины с прямоугольными перфорированными выступами, как и в случае сплошного выступа, ниже, чем на плоской стенке. В количественном отношении они различаются между собой незначительно.

Локальные относительные коэффициенты теплоотдачи на поверхности пластины с прямоугольными перфорированными выступами во всех рассмотренных случаях, в том числе и для сплошного выступа, различны, и они существенно отличаются от аналогичного параметра на плоской стенке (рис. 11, *б*). В случае сплошного выступа непосредственно за выступом (сечение 6,  $x/h = 2,13$ ) в конце рециркуляционной зоны (начало рециркуляционной зоны в точке удара потока в стенку) имеет место резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи, аналогичный результат отмечен и в работе [13]. При дальнейшем удалении по течению от выступа интенсивность теплоотдачи увеличивается и достигает своего максимума в точке встречи оторвавшегося потока с поверхностью пластины в сечении 8 ( $x/h = 8,38$ ), а затем теплоотдача постепенно уменьшается до уровня плоской стенки. В остальных случаях коэффициент теплоотдачи до выступа практически почти не отличается от его значения для плоской стенки. В случае выступа с перфорацией внизу интенсивность теплоотдачи до выступа несколько выше, чем у пластины, а после выступа коэффициент теплоотдачи монотонно возрастает до своего максимального значения в сечении 7 ( $x/h = 5,25$ ), т. е. значительно ближе к выступу, чем для сплошного выступа. Следует отметить, что при этом по абсолютной величине коэффициент теплоотдачи превосходит все рассматриваемые случаи. Для выступа с перфорацией сверху коэффициент теплоотдачи в окрестности выступа несколько возрастает, а затем снижается и с сечения 5 ( $x/h = 0,56$ ) остается примерно на одном уровне, несколько ниже чем у пластины. В случае перфорации с шахматным расположением отверстий коэффициент теплоотдачи не испытывает резких изменений перед выступом. Таким образом, можно предположить, что с точки зрения интенсификации теплоотдачи варианты *а* и *в* более предпочтительны. Исследования показали, что в случае использования перфори-

рованных выступов для интенсификации теплообмена необходимо использовать неоднородную перфорацию, причем с большей пористостью у стенки.

**Заключение.** В работе экспериментально исследованы процессы гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании прямоугольных перфорированных выступов, установленных на плоской стенке при  $q_w = \text{const}$  с разным расположением отверстий и разной пористостью. Получены новые экспериментальные данные по средним и пульсационным характеристикам в турбулентном пограничном слое при обтекании прямоугольных перфорированных выступов. Показано, что структура вихревых зон до и после перфорированного выступа существенно зависит от формы, размеров и пористости выступа. Пульсации температуры и особенно скорости в пограничном слое за перфорированным выступом существенно выше, чем на плоской стенке. Характер изменения коэффициентов трения и теплоотдачи указывает на опережающий рост коэффициента теплоотдачи за прямоугольными выступами размером  $30 < y^+ < 100$ .

Экспериментально установлено, что струйные потоки, падающие на поверхность теплообмена из перфорированных выступов, смещают точку присоединения вниз по потоку (см. рис. 1, варианты а и в) по сравнению со сплошным выступом. Струйные потоки, падающие на поверхность теплообмена, из перфорированного выступа значительно улучшают теплообмен сразу после выступа по сравнению со сплошным выступом.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Afanasiev V.N., Veselkin V.Yu., Leontiev A.I., Skibin A.P., Chudnovsky Ya.P. Thermohydraulics of Flow Over Isolated Depressions (Pits, Grooves) in a Smooth Wall. *Heat Transfer Research*, 1993, vol. 25 (1), pp. 22–56.
- [2] Isaev S.A., Leontiev A.I., Kudryavtsev N.A. Numerical Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer under Conditions of Turbulent Transverse Flow Past a “Trench” on a Plane Surface. *High Temp.*, 2005, vol. 43 (1), pp. 89–102.
- [3] Afanasyev V.N., Chudnovsky Ya.P., Leontiev A.I., Roganov P.S. Turbulent Flow Friction and Heat Transfer Characteristics for Spherical Cavities on a Flat Plate. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1993, vol. 7 (1), pp. 1–8.
- [4] Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M., Vinogradov Y.A. Experimental Investigation of Heat Transfer and Drag on Surfaces with Spherical Dimples. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, vol. 79, pp. 74–84.
- [5] Larichkin V.V., Yakovenko S.N. Effect of Boundary-Layer Thickness on the Structure of a Near-Wall Flow with a Two-Dimensional Obstacle. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2003, vol. 44 (3), pp. 76–84.
- [6] Wang L., Salewski M., Sunden B. Turbulent Flow in a Ribbed Channel: Flow Structures in the Vicinity of a Rib. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2010, vol. 34, pp. 165–176.

- [7] Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular Ribs in Turbulent Boundary Layer on the Initially Smooth Surface. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017, vol. 891, 012140.
- [8] 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 Transf.*, 2003, vol. 46, pp. 4535–4551.
- [9] Smulsky Ya.I., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Heat Transfer in Turbulent Separated Flow Behind a Rib on the Surface of Square Channel at Different Orientation Angles Relative to Flow Direction. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, vol. 55, pp. 726–733.
- [10] Tariq A., Panigrahi P.K., Muralidhar K. Flow and Heat Transfer in the Wake of a Surface-Mounted Rib with a Slit. *Exp. Fluids*, 2004, vol. 37, pp. 701–719.
- [11] Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. *Интенсификация теплообмена в каналах*. Москва, Машиностроение, 1990, 206 с.
- [12] Мигай В.К. *Повышение эффективности современных теплообменников*. Ленинград, Энергия, Ленингр. отд., 1980, 144 с.
- [13] Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смольский Я.И., Ярыгина Н.И. *Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках*. Терехова В.И., ред. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2016, 247 с.
- [14] Liou T.M., Chen S.H. Turbulent Heat and Fluid Flow in a Passage Disturbed by Detached Perforated Ribs of Different Heights. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1998, vol. 41, pp. 1795–1806.
- [15] Hwang J.J., Lia T.Y., Liou T.M. Effect of Fence Thickness on Pressure Drop and Heat Transfer in a Perforated-Fenced Channel. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1998, vol. 41, pp. 811–816.
- [16] Sara O.N., Pekdemir T., Yapici S., Yilmaz M. Heat-Transfer Enhancement in a Channel Flow with Perforated Rectangular Blocks. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2001, vol. 22, pp. 509–518.
- [17] Nuntadusit C., Wae-hayee M., Bunyajitradulya A., Eiamsa-ard S. Thermal Visualization on Surface with Transverse Perforated Ribs. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2012, vol. 39, pp. 634–639.
- [18] Huang K.D., Tzeng S.C., Jeng T.M., Wang J.R., Cheng S.Y., Tseng K.T. Experimental Study of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in the Square Channel with a Perforation Baffle. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 35, pp. 1106–1112.
- [19] Buchlin J.M. Convective Heat Transfer in a Channel with Perforated Ribs. *Int. J. Therm. Sci.*, 2002, vol. 41, pp. 332–340.
- [20] Karwa R., Maheshwari B.K., Karwa N. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in an Asymmetrically Heated Rectangular Duct with Perforated Baffles. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2005, vol. 32, pp. 275–284.
- [21] Jørgensen F.E. *How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers — a Practical Guide*. Skovlunde, Dantec Dynamics, 2002, 73 p.
- [22] Moffat R.J. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1988, vol. 1 (1), pp. 3–17.
- [23] Clauser F.H. The Turbulent Boundary Layer. *Adv. Appl. Mech.*, 1956, vol. 4, pp. 1–51.
- [24] Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. *Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое*. Москва, Энергия, 1972, 342 с.

Статья поступила в редакцию 19.04.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Афанасьев В.Н., Дехай Кон, Гетя С.И., Трифонов В.Л. Экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя при наличии в нем прямоугольного перфорированного выступа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1897>

**Афанасьев Валерий Никанорович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области гидродинамики, тепломассообмена, компактных теплообменных аппаратов, монодисперсных сред и контурных тепловых труб. e-mail: a-mvtu@yandex.ru

**Кон Дехай** — аспирант кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 16 научных трудов в области интенсификации теплообмена и численного моделирования турбулентных течений. e-mail: kongdehai2013@gmail.com

**Гетя Сергей Иванович** — ведущий электроник кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области ядерных технологий, физического моделирования.

**Трифонов Валерий Львович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 40 научных работ в области автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания. e-mail: valvo3@yandex.ru

## Experimental study of the turbulent boundary layer in the presence of a rectangular perforated rib

© V.N. Afanasiev, Dehai Kong, S.I. Getya, V.L. Trifonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Separated flows are widespread in many areas of science and technology, such as space technology, aviation, gas turbines, etc., which has a significant effect on the processes of hydrodynamics and heat transfer in them. The separation of the flow and its reattachment can serve as a powerful means of enhancing heat and mass transfer processes, and its organization is quite simple and reliable in terms of technology. This paper presents the results of the experimental study on hydrodynamics and heat transfer in the separation zone in front and behind a single rectangular perforated rib located on a flat plate heated by the law of  $q_w = \text{const}$ . Experimental measurements were carried out using the Pitot-Prandtl tube and Dantec Dynamics hot-wire anemometry system, which allows us to obtain new characteristics of the turbulent boundary layer, both mean and oscillatory ones. We analyzed the influence of the perforation ratio of the rib and the location of the holes in the rib on the heat transfer efficiency. It was established that the stagnant and recirculation zones in front and behind the perforated rib were shifted and became smaller or disappeared. Findings of research show that jet flows, impinging on the heat transfer surface from the perforation holes, provide more efficient heat transfer behind the perforated rib, compared to that behind the solid rib.

**Keywords:** perforated rib, experimental investigation, turbulent boundary layer, separated flows, heat transfer enhancement

### REFERENCES

- [1] Afanasiev V.N., Veselkin V.Yu., Leontiev A.I., Skibin A.P., Chudnovsky Ya.P. Thermohydraulics of flow over isolated depressions (pits, grooves) in a smooth wall. *Heat Transfer Research*, 1993, vol. 25 (1), pp. 22–56.
- [2] Isaev S.A., Leontiev A.I., Kudryavtsev N.A. Numerical Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer under Conditions of Turbulent Transverse Flow Past a “Trench” on a Plane Surface. *High Temp.*, 2005, vol. 43 (1), pp. 89–102.
- [3] Afanasyev V.N., Chudnovsky Ya.P., Leontiev A.I., Roganov P.S. Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1993, vol. 7 (1), pp. 1–8.
- [4] Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M., Vinogradov Y.A. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2016, vol. 79, pp. 74–84.
- [5] Larichkin V.V., Yakovenko S.N. Effect of boundary-layer thickness on the structure of a near-wall flow with a two-dimensional obstacle. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2003, vol. 44 (3), pp. 76–84.
- [6] Wang L., Salewski M., Sunden B. Turbulent Flow in a Ribbed Channel: Flow Structures in the Vicinity of a Rib. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2010, vol. 34, pp. 165–176.
- [7] Afanasiev V.N., Kong D.H. Rectangular Ribs in Turbulent Boundary Layer on the Initially Smooth Surface. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017, vol. 891, 012140.
- [8] 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 Transf.*, 2003, vol. 46, pp. 4535–4551.

- [9] Smulsky Ya.I., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Heat Transfer in Turbulent Separated Flow Behind a Rib on the Surface of Square Channel at Different Orientation Angles Relative to Flow Direction. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2012, vol. 55, pp. 726–733.
- [10] Tariq A., Panigrahi P.K., Muralidhar K. Flow and Heat Transfer in the Wake of a Surface-Mounted Rib with a Slit. *Exp. Fluids*, 2004, vol. 37, pp. 701–719.
- [11] Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Heat transfer enhancement in channels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 206 p.
- [12] Migay V.K. *Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov* [Heat exchanger efficiency improvement]. Leningrad, Energiya Publ., 1980, 144 p.
- [13] Terekhov V.I., Bogatko T.V., Dyachenko A.Yu., Smulskiy Ya.I., Yarygina N.I. *Teploobmen v dozvukovykh omryvnykh pomoka* [Heat transfer in subsonic separated flows]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016, 247 p.
- [14] Liou T.M., Chen S.H. Turbulent Heat and Fluid Flow in a Passage Disturbed by Detached Perforated Ribs of Different Heights. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1998, pp. 411795–1806.
- [15] Hwang J.J., Lia T.Y., Liou T.M. Effect of Fence Thickness on Pressure Drop and Heat Transfer in a Perforated-Fenced Channel. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1998, vol. 41, pp. 811–816.
- [16] Sara O.N., Pekdemir T., Yapici S., Yilmaz M. Heat-Transfer Enhancement in a Channel Flow with Perforated Rectangular Blocks. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2001, vol. 22, pp. 509–518.
- [17] Nuntadusit C., Wae-hayee M., Bunyajitradulya A., Eiamsa-ard S. Thermal Visualization on Surface with Transverse Perforated Ribs. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2012, vol. 39, pp. 634–639.
- [18] Huang K.D., Tzeng S.C., Jeng T.M., Wang J.R., Cheng S.Y., Tseng K.T. Experimental Study of Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in the Square Channel with a Perforation Baffle. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 35, pp. 1106–1112.
- [19] Buchlin J.M. Convective Heat Transfer in a Channel with Perforated Ribs. *Int. J. Therm. Sci.*, 2002, vol. 41, pp. 332–340.
- [20] Karwa R., Maheshwari B.K., Karwa N. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in an Asymmetrically Heated Rectangular Duct with Perforated Baffles. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2005, vol. 32, pp. 275–284.
- [21] Jørgensen F.E. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide*. Skovlunde, Dantec Dynamics, 2002, 73 p.
- [22] Moffat R.J. Describing the Uncertainties in Experimental Results. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1988, vol. 1 (1), pp. 3–17.
- [23] Clauser, F.H. The Turbulent Boundary Layer. *Adv. Appl. Mech.*, 1956, vol. 4, pp. 1–51.
- [24] Kutateladze S.S., Leontiev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pograničnom sloe* [Heat transfer, mass transfer, and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 342 p.

**Afanasiev V.N.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 publications in the field of hydrogasdynamics, heat-mass transfer, compact heat exchangers, monodisperse media and loop heat pipes. e-mail: a-mvtu@yandex.ru



**Kong Dehai**, post-graduate student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of 16 publications in the field of heat transfer enhancement and numerical simulation of turbulent flows.

e-mail: kongdehai2013@gmail.com

**Getya S.I.**, Leading Researcher, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications in the field of nuclear engineering, physical modeling.

**Trifonov V.L.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 scientific papers in the field of automatic control of internal combustion engines.

e-mail: valvo3@yandex.ru