

УДК 532.529

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ ВЫСТУПОМ И ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНОЙ НА СТРУКТУРУ ПРИСТЕНОЧНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН

© 2019 г. С. А. Исаев<sup>1</sup>, В. Н. Афанасьев<sup>2</sup>, К. С. Егоров<sup>2</sup>, Дехай Кон<sup>2</sup>, \*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*E-mail: kongdehai2013@gmail.com

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

После доработки 22.08.2018 г.

Принята к публикации 10.10.2018 г.

Представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования динамических и тепловых характеристик турбулентного пограничного слоя воздуха около нагретой пластины при  $q_w = \text{const}$  с установленными на ней прямоугольными выступами со щелевыми каналами различной геометрии: конфузорным, диффузорным и плоскопараллельным. Щелевой канал располагается между пластиной и нижней стенкой выступа. Проведено сравнение с аналогичными данными для сплошного выступа без щелевого канала. Для исследований использовались микрозонд Пито–Прандтля с микротермопарой и термоанемометрический комплекс Dantec Dynamics, что позволило изучить ламинарный подслей, переходную область и внешнюю часть пограничного слоя. Определено влияние профилирования щели на средние и пульсационные характеристики турбулентного динамического и теплового пограничных слоев в срединном сечении пластины со щелевым выступом. Установлено, что в потоке за выступами с конфузорной щелью устраняется отрывная зона.

DOI: 10.1134/S0040364419030074

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание высокоэффективных, компактных и надежных систем охлаждения являются актуальной проблемой, которая часто и успешно решается путем использования эффективных методов интенсификации теплообмена. Большой практический интерес вызывают методы, в которых предлагается воздействовать на поток, в первую очередь на пограничный слой, с помощью различных интенсификаторов, таких как траншеи [1, 2], упорядоченные пакеты сферических углублений [3, 4], ребер, выступов и впадин различной геометрии [5–29] и т.п.

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 случайного происхождения встречаются на многих конвективных поверхностях, например в случаях 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 воз-

никновению явлений, оказывающих существенное влияние на сопротивление и теплообмен. Во многих работах [10–17] акцент делается на сопоставление интегральных характеристик переноса теплоты и импульса, однако в последние годы появились работы, в которых большое внимание уделяется детальному исследованию структуры потока и локальных характеристик течения и теплообмена вблизи интенсификаторов теплообмена с использованием современных экспериментальных и численных методов диагностики. Среди них можно отметить численное исследование структуры течения и теплообмена прямым численным моделированием (Direct Numerical Simulation – DNS) [18] и экспериментальные исследования с применением PIV (Particle Image Velocimetry) [19, 20].

Одной из задач интенсификации конвективного теплообмена является такое воздействие на пограничный слой, которое сделало бы его более тонким или частично разрушило. Поскольку турбулизация потока связана с затратами энергии, то при разработке эффективных методов интенсификации теплообмена представляется важным рациональный выбор места расположения и устройства турбулизатора. Наиболее эффективным является метод интенсификации, который бы воздействовал на пристеночные слои жидко-

сти на расстоянии порядка  $y^+ \leq 30-100$  от стенки, не оказывая влияния на ядро потока [5, 6, 10, 30]. Именно такой метод способен обеспечить существенное увеличение коэффициента теплоотдачи при умеренном росте коэффициента трения, т.е. достичь опережающего роста теплоотдачи над увеличением сопротивления трения. Традиционный интерес представляют выступы, утопленные в пограничный слой и несколько заходящие по высоте в переходную область, которые незначительно влияют на профильное сопротивление поверхности с выступом.

К эффективным методам управляемого воздействия на структуру пристеночного турбулентного потока относится организация отрывных зон и вихревых структур [31]. Одним из наиболее распространенных способов генерации вихрей являются поперечные выступы или канавки, размещаемые на поверхности теплообмена. Выступы и углубления могут иметь различную форму и размеры, что существенно сказывается на структуре пограничного слоя и процессах переноса тепла и импульса. В большинстве известных работ (см., например, [10]) исследуются характеристики отрывных течений и теплообмена в каналах в зависимости от относительных геометрических размеров выступов. В то же время крайне мало исследований внешнего обтекания поверхностей с выступами при различных толщинах пограничных слоев. Интерес представляет анализ влияния отношения высоты выступа к толщине пограничного слоя, шага между выступами к высоте выступа, отношения ширины выступа к толщине пограничного слоя, влияния формы выступа, расположения его под разными углами к основному потоку и т.п. Следует отметить, что в работах, как правило, исследуются выступы и ребра относительно больших размеров – соизмеримых или больше толщины пограничного слоя [8, 9, 12–14]. В [12] экспериментально проанализированы гидродинамические и теплообменные характеристики отрывного течения при изменении формы и высоты преграды, в том числе обратный уступ и поперечный тонкий выступ (ребро) с применением миниатюрной трубки Пито–Прандтля и микротермопар. Также с помощью сажемасляной визуализации определен размер рециркуляционной области за уступом и выступом. Как правило, анализ работ по теплообмену в отрывных зонах указывает на нарушение аналогии Рейнольдса в отрывной области не в пользу теплоотдачи.

Как известно, при обтекании сплошного выступа впереди него и за ним образуются низкоскоростные отрывные зоны, что значительно уменьшает коэффициент теплоотдачи в его окрестности. Как показано в [21], уменьшения или удаления этих зон можно достигнуть за счет перфорации выступа плоскопараллельными щелевыми каналами. Показано, что такой щелевой

выступ способен устранить отрывные зоны за счет дросселирующего эффекта [32]. Известно, что размещение на стенке канала проницаемых выступов позволяет увеличить эффективность теплоотдачи в сравнении с каналом со сплошными выступами. В работе [22] экспериментально исследованы турбулентные характеристики трения и теплоотдачи в прямоугольном канале с пористыми выступами, установленными на одной стенке. Показано, что зон с низким коэффициентом теплоотдачи в области за пористыми выступами не наблюдается. Более детально исследованы механизмы процессов переноса импульса и энергии при обтекании выступа со щелью в работе [23]. В работе [20] также исследована структура потока при обтекании проницаемых выступов с помощью PIV и поверхностной визуализации потока. Кроме того, во многих экспериментальных [24–26] и численных [27–29] исследованиях уделяется большое внимание изучению особенностей обтекания отсоединенных выступов или ребер. В [26] экспериментально проанализированы отсоединенные перфорированные выступы в прямоугольном канале. Все работы выполнены преимущественно для преград постоянного квадратного или прямоугольного сечений.

В данной работе предлагается интенсифицировать теплоотдачу путем использования прямоугольных протяженных щелевых поперечных выступов на пластине с тремя видами профилирования щели между пластиной и выступом: конфузорная щель, диффузорная щель и щель с постоянным сечением. Наличие зазора между выступом и стенкой канала формирует пристеночную струю в области отрывного течения за выступом.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования выполнялись на дозвуковой низкотурбулентной ( $\varepsilon = 0.2\%$ ) аэродинамической трубе открытого типа, работающей по принципу всасывания. Подробное описание методики эксперимента и экспериментальной установки приведено в [1, 3, 33]. Экспериментально анализировалось обтекание щелевых, прямоугольных, квадратных выступов высотой, соответствующей примерно  $y^+ < 100$ , где  $y^+ = yu_\tau/\nu$ .

Выступ прямоугольной формы с конфузорной, диффузорной щелями и щелью постоянного сечения, высотой  $h = 3.2$  мм и шириной  $b = 3.2$  мм, устанавливался на нагреваемую плоскую стенку перпендикулярно потоку на расстоянии  $l_x = 460$  мм от входа в рабочий участок. Схема расположения выступа, его форма и размеры показаны на рис. 1 и в таблице. Скорость внешнего потока в первом сечении на расстоянии 425 мм от входа в рабочую часть канала поддерживалась равной примерно 15.5 м/с, что соответствует числу Рей-

нольдса, рассчитанному по толщине потери импульса в этом сечении, равном  $Re^{**} = 1500$ .

Все измерения были выполнены с помощью микрозонда Пито–Прандтля с микротермопарой диаметром  $d = 0.1$  мм, специально разработанного и созданного для работы в пограничном слое, и термоанемометрического комплекса Dantec Dynamics, что позволило исследовать ламинарный подслей, переходную область пограничного слоя, а также получить средние и пульсационные характеристики течения. Профили продольной скорости и ее пульсации в различных сечениях пограничного слоя измерялись с помощью однониточного 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 выполнены с использованием температурного модуля Dantec Dynamics 90C20, являющегося термоанемометром постоянного тока (ССА), который включает в себя миниатюрный датчик с позолоченной вольфрамовой нитью (тип 55P04) диаметром 5 мкм и общей длиной 3 мм, работающий как термометр сопротивления. Для зондирования пограничного слоя используется система координатного устройства, включающая координатник, шаговый двигатель и блок питания. Точность перемещения датчика координатным устройством составляет порядка 0.02 мм. Калибровка датчиков термоанемометра проводится на тарировочном устройстве. Предельная относительная погрешность измерения скорости с использованием микроманометра 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%-ного доверительного интервала согласно изложенному методу в работах [34, 35]. Неопределенность средней скорости и температура были оценены  $\pm 4$  и  $\pm 3.6\%$  соответственно. Неопределенность измерения среднеквадратичной величины продольных пульсаций скорости и температуры оценивалась соответственно в  $\pm 8$  и  $\pm 7\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе экспериментально исследовались средние и пульсационные динамические и тепловые характеристики отрывного течения при обтекании одиночных прямоугольных выступов с конфузурной, диффузурной щелями и щелью постоянного сечения в турбулентном пограничном

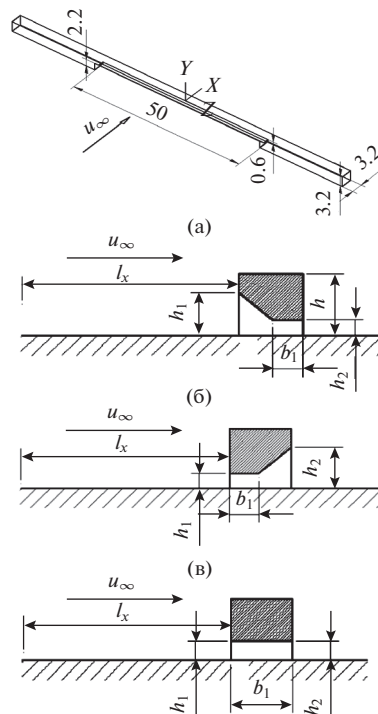


Рис. 1. Схема расположения прямоугольного щелевого выступа на пластине: (а) – с конфузурной щелью, (б) – с диффузурной щелью, (в) – со щелью постоянного сечения.

слое, формирующемся при обтекании воздухом поверхности плоской пластины, нагреваемой постоянным тепловым потоком  $q_w = \text{const}$ .

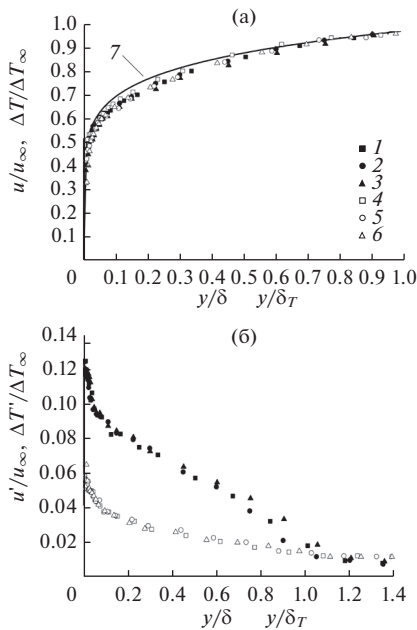
Совместное измерение распределений скорости и температуры и их пульсаций в турбулентном пограничном слое дает возможность количественно и качественно проанализировать и сопоставить теплообмен в различных областях пограничного слоя, включая вязкий подслей.

## ГЛАДКАЯ ПЛАСТИНА

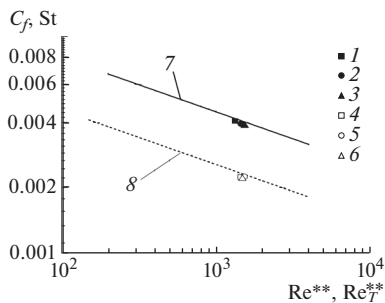
На рис. 2 приведены экспериментально определенные профили средних продольных скоростей и их пульсаций, средних температур и их пульсаций в трех сечениях на гладкой пластине до установки в этой области выступа. Эти профили в пограничном слое в трех сечениях имеют вид,

Размеры исследуемых выступов

Вариант на рис. 1	Тип щели	Высота выступа $h$ , мм	Размер щели, мм		
			$h_1$	$h_2$	$b_1$
(а)	Конфузурная	3.2	2.2	0.6	1.5
(б)	Диффузурная	3.2	0.6	2.2	1.5
(в)	Постоянная	3.2	1.0	1.0	3.2



**Рис. 2.** Распределение скорости и температуры (а) и их пульсаций (б) в пограничном слое в трех сечениях ( $l_x = 450, 500, 550$  мм): 1–3 – скорость, 4–6 – температура, 7 – “закон  $1/7$ ”.



**Рис. 3.** Законы трения и теплообмена на плоской пластине в трех сечениях ( $l_x = 450, 500, 550$  мм): 1–3 –  $C_f$ , 4–6 –  $St$ , 7 –  $C_f = 0.0252(Re^{**})^{-0.25}$ , 8 –  $St = 0.0144(Re_T^{**})^{-0.25}$ .

характерный для плоской стенки, а состояние пограничного слоя соответствует полностью развитому турбулентному слою. На это указывает и величина формпараметра в этих сечениях  $H = \delta^*/\delta^{**} = 1.35–1.37$ , т.е. имеется соответствие с законом одной седьмой.

Пульсации скорости и температуры в трех сечениях (рис. 2б) имеют вид, характерный для турбулентного пограничного слоя при безградиентном обтекании пластины. Аналогично данным [1, 3, 6, 27] 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.

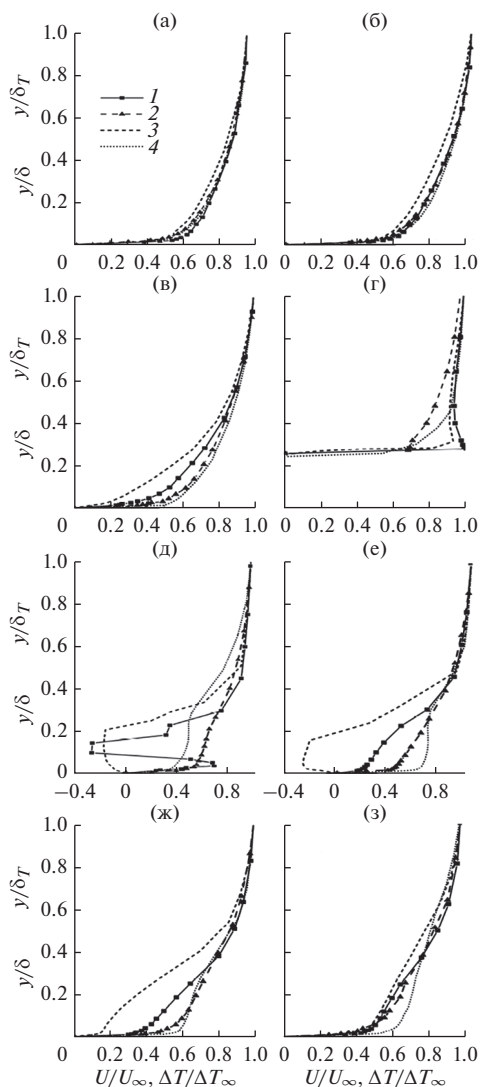
Приведенные на рис. 3 значения локальных коэффициентов трения и теплоотдачи достаточно хорошо согласуются с известными законами трения и теплообмена [1, 25]. Локальные коэффициенты трения определялись методом Клаузера по логарифмической части профиля скорости в пограничном слое и по наклону профиля скорости в ламинарном подслое, а также построены по толщине потери импульса. Локальные коэффициенты теплоотдачи рассчитаны по потере энергии и по наклону профиля температуры в ламинарном подслое. Их хорошее согласование с известными зависимостями свидетельствует о приемлемости используемых методик определения трения и коэффициентов теплоотдачи.

### ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВЫСТУП С КОНФУЗОРНОЙ ЩЕЛЬЮ

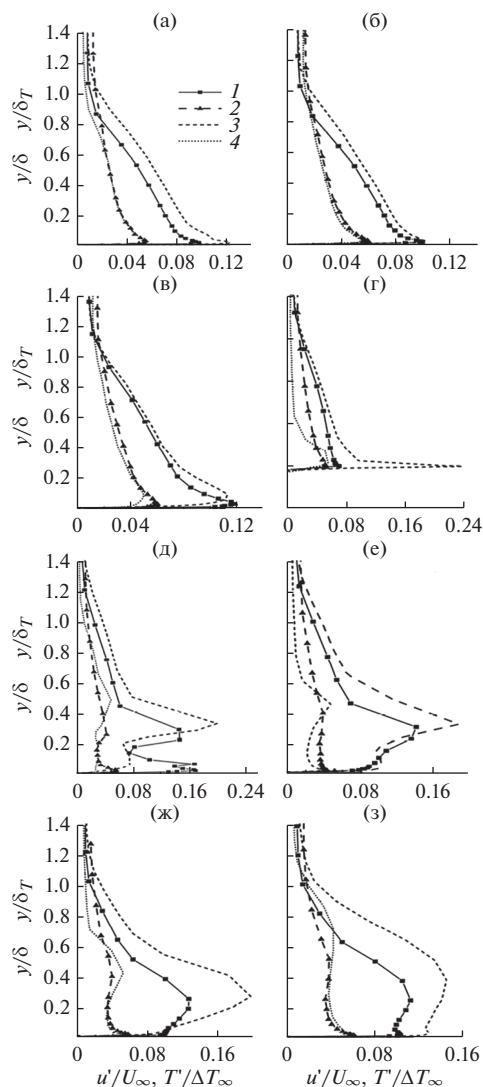
Структура безградиентного турбулентного пограничного слоя экспериментально исследовалась как перед прямоугольным выступом, так и за ним в диапазоне взаимного расположения выступа и сечений замера  $-11.94 < x/h < 18.06$ , где  $x$  – расстояние от задней стенки выступа до исследуемого сечения,  $h$  – высота выступа.

На рис. 4 представлены распределения скорости и температуры (где  $\Delta T = T_w - T$ ,  $\Delta T_\infty = T_w - T_\infty$ ) в пограничном слое в сечениях указанного интервала для прямоугольного выступа с конфузурной щелью (рис. 1а) в восьми сечениях. Из рассмотрения полученных результатов видно, что профили скорости и температуры при подходе к выступу (первое  $x/h = -11.94$  и второе  $x/h = -5.7$  сечения) остаются практически неизменными, однако по мере приближения к выступу профиль скорости, начиная с третьего сечения  $x/h = -1.94$ , деформируется и становится менее заполненным. На это также указывает изменение формпараметра  $H = 1.37, 1.41$  и  $1.62$ , который начинает увеличиваться. В отличие от скорости профили температуры слабо реагируют на выступ и практически совпадают с законом одной седьмой. Они более заполнены, чем профили скорости, что соответствует данным [7], т.е. более консервативны к влиянию выступа и изменению его формы.

В окрестности сечения 3 ( $x/h = -1.94$ ), в отличие от результатов [7] для сплошного прямоугольного выступа, наличие вихря или застойной зоны не наблюдается, что хорошо видно из рассмотрения профилей продольной скорости и ее пульсаций (рис. 4 и 5). Характер течения перед щелевым выступом совершенно иной по сравнению со сплошным выступом [7]. В случае конфузурного выступа часть пристенного потока устремляется в щель и ускоряется, а другая часть огибает выступ и за ним устремляется к стенке.



**Рис. 4.** Распределение скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с конфузорной щелью (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4): 1, 3 –  $U/U_\infty$ ; 2, 4 –  $\Delta T/\Delta T_\infty$ ; (а) – сечение 1,  $x/h = -11.94$ ; (б) – 2,  $-5.7$ ; (в) – 3,  $-1.94$ ; (г) – 4,  $-0.5$ ; (д) – 5,  $0.94$ ; (е) – 6,  $2.44$ ; (ж) – 7,  $10.25$ ; (з) – 8,  $18.06$ .



**Рис. 5.** Распределение пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с конфузорной щелью (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4): 1, 3 –  $u'/U_\infty$ ; 2, 4 –  $T'/T_\infty$ ; (а)–(з) – то же, что на рис. 4.

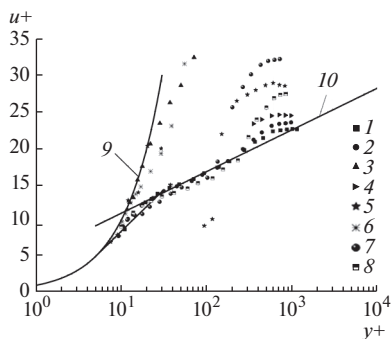
Распределения пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с конфузорной щелью представлено на рис. 5. Перед выступом во всех сечениях распределения пульсаций скорости и температуры практически совпадают с соответствующими характеристиками при безградиентном обтекании пластины без выступа. В сечении 3 при входе в щель максимум пульсаций скорости у стенки несколько возрастает, что, скорее всего, связано с ускорением потока при входе в профилированную щель.

В сечении 4 над выступом несколько увеличиваются пульсации скорости и температуры. Следует отметить, что над выступом характер изме-

нения исследуемых параметров существенно зависит от места расположения сечения замера.

За выступом образуется сложное течение, как видно из рис. 4 и 5. В области между сечениями 5 и 8 ( $0.94 < x/h < 18.06$ ) происходит смешение внешнего потока, оторвавшегося от поверхности выступа, и ускоренного пристеночного потока, истекающего из конфузорной щели. Наблюдается сильная деформация профилей температуры и особенно профилей скорости и ее пульсаций. Увеличение в сечениях 6–7 формпараметра  $H = 4.31$  и  $2.19$  указывает на наличие значительного влияния выступа на профили скорости. Профили температуры за выступом и их пульсации слабо изменяются. Сразу за выступом (сечение 5,  $x/h = 0.94$ ),





**Рис. 6.** Универсальный логарифмический закон распределения скорости при обтекании прямоугольного выступа с конфузрной щелью:  $x/h = -11.94$  (1),  $-5.7$  (2),  $-1.94$  (3),  $-0.5$  (4),  $0.94$  (5),  $2.44$  (6),  $10.25$  (7),  $18.06$  (8), 9 – расчет по (1), 10 – по (2).

в его верхней части ( $h - h_2$ ), в отличие от обтекания сплошного выступа [7] наблюдается небольшой присоединенный вихрь, что хорошо видно из рассмотрения профиля скорости и ее пульсаций (рис. 4 и 5). На возникновение присоединенного вихря за выступом указывает изменение направления скорости потока на противоположное (рис. 4д). В сечении 6 ( $x/h = 2.44$ ) следов вихря уже не наблюдалось и в сечениях 7 и 8 пограничный слой возвращается к своему нормальному состоянию, соответствующему безградиентному турбулентному обтеканию пластины.

В данных экспериментальных исследованиях обтекания выступа с конфузрной щелью отрывных зон перед выступом и за ним не наблюдается. Однако непосредственно за уступом (рис. 4д и 5д) существенные изменения происходят в профиле скорости и ее пульсациях. В распределении пульсаций скорости (рис. 5д) наблюдается три максимума и два в распределении пульсаций температуры. Таким образом, за выступом в распределении пульсаций скорости имеется три источника порождения турбулентности – пульсаций скорости: поверхность теплообмена, конфузрная поверхность выступа, зона отрыва основного потока от верхней поверхности выступа. В сечении 5 пульсации скорости у стенки несколько превосходят интенсивность турбулентности в зоне смешения. Кроме того, за выступом в зоне смешения (рис. 5) видно, что максимум пульсаций скорости существенно превосходит максимум пульсаций температуры – это объясняется большей деформацией профиля скорости по сравнению с деформацией профиля температуры. У пульсаций температуры два слабо выраженных максимума: у стенки и в зоне смешения. Второй максимум пульсаций скорости уже в сечении 6 сливается с первым и, начиная с этого сечения, у пульсаций температуры и у пульсаций скорости наблюдаются только два максимума, причем максимум pulsa-

ций скорости в зоне смешения растет значительно быстрее пристеночного и превосходит его.

Из рассмотрения профилей скорости и температуры (рис. 4) видно, что они имеют небольшие изломы. Первые изломы профилей скорости и температуры совпадают с максимумами соответствующих пульсаций у исходно гладкой поверхности – поверхности теплообмена, а вторые – со вторым максимумом соответствующих пульсаций, который находится в зоне отрыва потока от внешней поверхности выступа. Кроме того, из рассмотрения полученных результатов видно, что за выступом с конфузрной щелью возвратное течение отсутствует, размер области которого, как известно [7], в случае сплошного выступа составляет порядка  $x/h = 7-8$  калибров.

Иначе себя ведут пульсации скорости, из распределения которых видно (рис. 5), что максимум пульсаций скорости сохраняется на линии тока, идущей от верхней границы вихря, и что область повышенных пульсаций расширяется, т.е. турбулентные пульсации, возникающие на верхней границе вихря, переносятся осредненным течением вдоль линий тока, постепенно затухая и диффундируя в стороны от нее. Таким образом, по мере удаления от выступа зона максимумов пульсаций расширяется и увеличивается, но она не оказывает влияние на средние характеристики – профили средних скоростей и температур за выступом возвращаются к закону одной седьмой.

На рис. 6 представлено сравнение экспериментально полученных профилей скорости с универсальным логарифмическим законом распределения скорости в турбулентном пограничном слое на плоской пластине:

$$u^+ = y^+ \text{ для } y^+ < 5, \tag{1}$$

$$u^+ = 5.75 \lg y^+ + 5.2 \text{ для } y^+ > 30, \tag{2}$$

где  $u^+ = u/u_\tau$  – безразмерная скорость;  $y^+ = yu_\tau/\nu$  – безразмерная координата;  $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{0.5}$  – динамическая скорость.

Такое представление профилей скорости 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, используя рис. 6, можно судить о степени воздействия турбулизатора (выступа) на пристеночную область пограничного слоя – в первую очередь на ламинарный подслой, буферную область и логарифмическую часть пограничного слоя. Динамическая скорость, по которой обрабатывались логарифмические профили, определена по логарифмической части профиля скоро-

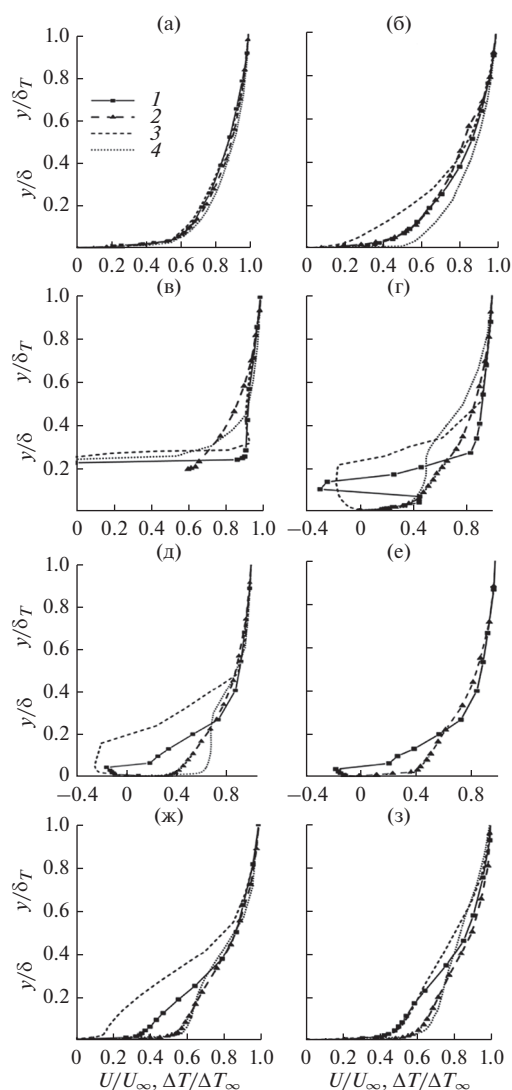
сти в пограничном слое (метод Клаузера) и по наклону профиля скорости в ламинарном подслое (закон Ньютона) в сечениях 1, 2 и 8. В отрывных зонах, где в профилях скорости нет логарифмического участка, динамическая скорость рассчитана только по наклону профиля скорости в ламинарном подслое (закон Ньютона). Из рассмотренного рис. 6 видно, что в сечениях 1 и 2 профиль скорости практически еще не реагирует на приближение выступа — имеет место стандартный турбулентный пограничный слой. После выступа в сечениях 7 и 8 также восстанавливается стандартный турбулентный пограничный слой. Профили средних скоростей и температур за выступом между шестым и седьмым сечениями формируются после смешения оторвавшегося от поверхности выступа потока с пристеночной струей, истекающей из щели. В результате возникает новый пограничный слой, который постепенно возвращается к закону одной седьмой (рис. 6).

### ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВЫСТУП С ДИФFUЗОРНОЙ ЩЕЛЮЮ

На рис. 7 представлены измеренные профили скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с диффузорной щелью (рис. 1б) (в интервале  $-12.6 < x/h < 18.13$ ). Из рассмотрения полученных результатов рис. 7 и 8 видно, что профили скорости, температуры и их пульсаций перед уступом практически совпадают с аналогичными результатами для выступа с конфузурной щелью.

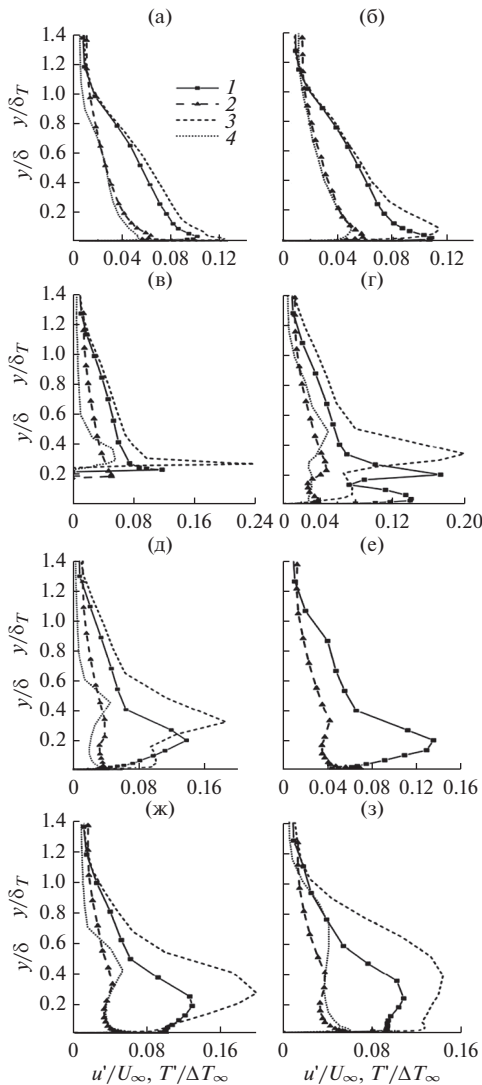
В случае выступа с диффузорной щелью, как и в случае выступа с конфузурной щелью, часть пристеночного потока устремляется в щель, где он замедляется в расширяющейся части щели. На выходе за выступом эта часть потока взаимодействует с той его частью, которая огибает выступ и, отрываясь от него, устремляется к стенке. Картина течения за выступом с диффузорной щелью в целом аналогична картине обтекания сплошного прямоугольного выступа [7]. Однако отрывная зона за щелевым выступом оказывается существенно меньшей ( $x/h \approx 4-5$ ) по сравнению с аналогичной зоной ( $x/h \approx 8$ ) для сплошного прямоугольного выступа [7].

Различное влияние выступа на пульсационные характеристики пограничного слоя иллюстрируется распределением пульсаций скорости в последних сечениях ( $x/h = 5-18.13$ ). Профили осредненных скоростей и температур в рассматриваемых сечениях практически приближаются к закону одной седьмой, а пульсации скорости и температуры в этих сечениях существенно выше, чем для соответствующих параметров при безградиентном течении.



**Рис. 7.** Распределение скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с диффузорной щелью (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4): 1, 3 —  $U/U_\infty$ ; 2, 4 —  $\Delta T/\Delta T_\infty$ ; (а) — сечение 1,  $x/h = -12.6$ ; (б) — 2,  $-2$ ; (в) — 3, 0; (г) — 4, 1; (д) — 5, 2; (е) — 6, 3; (ж) — 7, 10; (з) — 8, 18.13.

Непосредственно за уступом в сечении  $x/h = 1$  (рис. 8) заметные изменения наблюдаются в пульсациях скорости и температуры. В распределении пульсаций скорости и температуры отмечаются два максимума, т.е. имеется два источника порождения турбулентности — пульсаций скорости: поверхность теплообмена и зона отрыва основного потока от верхней поверхности выступа. Во всех сечениях за выступом пульсации скорости в зоне смешения существенно выше, чем у стенки. Кроме того, за выступом в зоне смешения (рис. 8) максимум пульсаций скорости существенно превосходит максимум пульсаций температуры. Это же имело место и в случае выступа с



**Рис. 8.** Распределение пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа с диффузорной щелью (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4): 1, 3 –  $u'/U_\infty$ ; 2, 4 –  $T'/\Delta T_\infty$ ; (а)–(з) – то же, что на рис. 7.

конфузорной щелью (рис. 5). У пульсаций температуры наблюдаются два максимума: у стенки и в зоне смешения. Максимум пульсаций скорости в зоне смешения растет значительно быстрее пристеночного максимума и превосходит его. По мере развития течения за выступом максимум пульсаций несколько снижается, но профиль пульсаций становится более наполненным и утолщается.

Как и в случае конфузорной щели, пульсации скорости существенно отличаются от безградиентного обтекания.

Распределение средних скоростей в универсальных логарифмических координатах во многом совпадает со случаем выступа с конфузорной щелью.

### ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВЫСТУП СО ЩЕЛЬЮ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

Профили скорости, температуры и их пульсации замеряются в восьми сечениях пограничного слоя для прямоугольного выступа со щелью постоянного сечения (рис. 1в) в интервале  $-11.94 < x/h < 20.88$ .

Из рассмотрения полученных результатов (рис. 9, 10) видно, что профили скорости, температуры и их пульсаций перед уступом практически совпадают с аналогичными результатами для выступов с конфузорной и диффузорной щелями. В окрестности сечения 3 (перед выступом  $x/h = -1.94$ ), как и в указанных выше случаях, в отличие от [7] для сплошного прямоугольного выступа наличие вихря перед щелевым выступом не наблюдается, что следует из рассмотрения профилей скорости и их пульсаций (рис. 9 и 10).

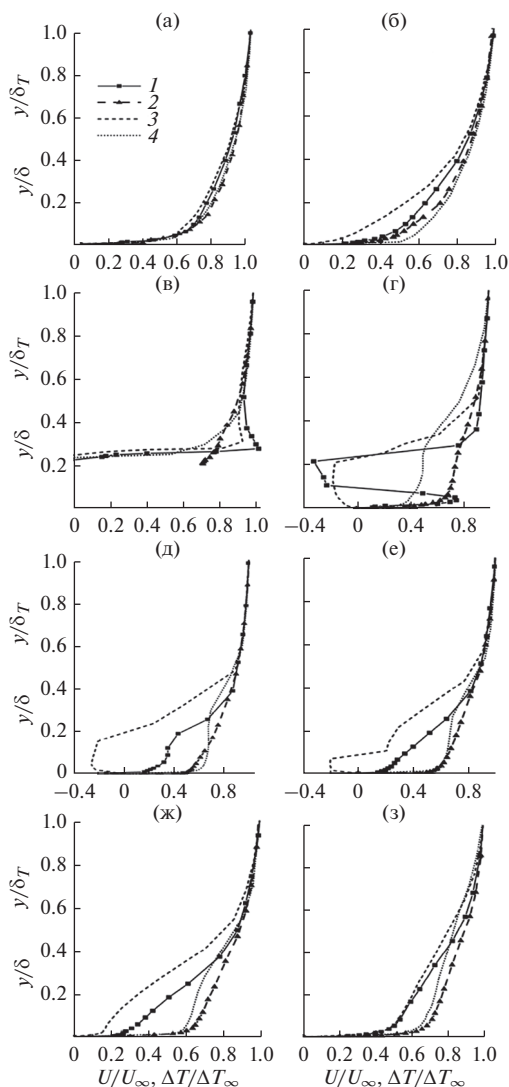
Как и в ранее описанных случаях с выступами с конфузорной и диффузорной щелями, часть пристеночного потока устремляется в щель, где она ускоряется, и на выходе за выступом эта часть потока взаимодействует с той его частью, которая огибает выступ и, отрываясь от него, устремляется к стенке. За выступом со щелью постоянного сечения картина течения во многом похожа на картину обтекания выступа с конфузорной щелью, однако в рассматриваемом случае отмечается небольшая область возвратного течения в верхней части выступа (в сечении  $x/h = 0.56$  на рис. 9 и 10). В сечении  $x/h = 2.13$  наблюдается очень тонкая отрывная зона.

Распределения пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа со щелью постоянного сечения представлены на рис. 10. Во всех сечениях перед выступом они практически совпадают с соответствующими характеристиками безградиентного обтекания пластины.

За рассматриваемым щелевым выступом образуется сложное вихревое течение, аналогичное формирующемуся при обтекании выступа с конфузорной щелью. Профиль температуры при этом практически не изменяется. В отрывной зоне существенное изменение претерпевают пульсации скорости и температуры (рис. 10), на что указывает появление трех максимумов в распределении пульсаций скорости и двух максимумов в распределении пульсаций температуры (рис. 10, сечение 5) подобно обтеканию выступа с конфузорной щелью.

Распределение средних скоростей в универсальных логарифмических координатах во многом аналогично случаям выступов с конфузорной и диффузорной щелями.

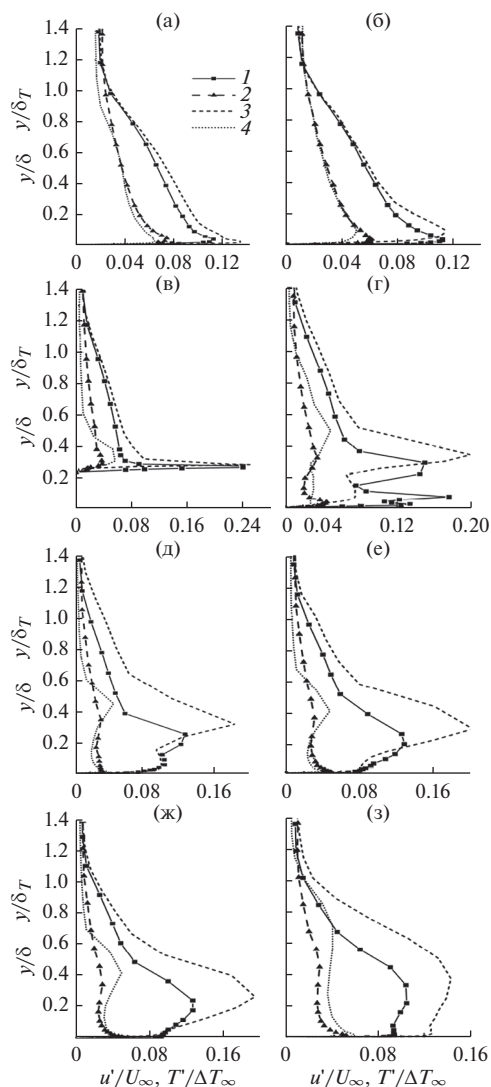




**Рис. 9.** Распределение скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа со щелью постоянного сечения (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4); 1, 3 –  $U/U_\infty$ ; 2, 4 –  $\Delta T/\Delta T_\infty$ ; (а) – сечение 1,  $x/h = -11.94$ ; (б) – 2,  $-1.94$ ; (в) – 3,  $-0.5$ ; (г) – 4,  $0.56$ ; (д) – 5,  $2.13$ ; (е) – 6,  $5.25$ ; (ж) – 7,  $8.38$ ; (з) – 8,  $20.88$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследованы процессы гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании воздухом поверхности пластины, обогреваемой постоянным тепловым потоком  $q_w = \text{const}$ , с установленными на ней поперек потока прямоугольными выступами ( $\delta/h \approx 4$ ) с конфузурной, диффузурной щелями и щелью постоянного сечения. Получены базы экспериментальных данных по средним и пульсационным характеристикам скорости и температуры вдоль середины пластины в сечениях турбулентного пограничного слоя при обтекании щелевых прямоугольных выступов. Показано, что перед щелевым выступом не образуется вихревых и от-



**Рис. 10.** Распределение пульсаций скорости и температуры в пограничном слое для прямоугольного выступа со щелью постоянного сечения (1, 2) и сплошного выступа [7] (3, 4); 1, 3 –  $u'/U_\infty$ ; 2, 4 –  $T'/\Delta T_\infty$ ; (а)–(з) – то же, что на рис. 9.

рывных зон. В пограничном слое за щелевыми выступами пульсации температуры имеют два максимума, а пульсации скорости в случае конфузурной щели и щели постоянного сечения характеризуются тремя максимумами, которые существенно выше, чем в безградиентном течении на плоской стенке. Пульсации температуры и скорости имеют два максимума в пограничном слое за выступом с диффузурной щелью, которые существенно выше, чем в слое на плоской стенке. Установлено, что за выступом с конфузурной щелью рециркуляционная зона отсутствует, а за выступом со щелью постоянного сечения и диффузурной щелью она существенно короче ( $x/h < 2.5$

и 5 соответственно), чем за сплошным выступом ( $x/h \approx 8$ ).

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-58-52005), Минобрнауки РФ (госзадание № 13.5521.2017/БЧ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В.Н., Веселкин В.Ю., Леонтьев А.И., Скибин А.П., Чудновский Я.П.* Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности: Препринт № 2-91. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 140 с.
2. *Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И.* Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 895.
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. V. 7. P. 1.
4. *Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M., Vinogradov Ya.A.* Experimental Investigation of Heat Transfer and Drag on Surfaces with Spherical Dimples // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. V. 79. P. 74.
5. *Афанасьев В.Н., Кон Д.* Гидродинамика и теплообмен при обтекании прямоугольных выступов на исходно гладкой поверхности // Наука и образование. Электр. журн. 2017. № 4. doi 10.7463/0417.0000932
6. *Afanasyev V.N., Kong Dehai.* Rectangular Ribs in Turbulent Boundary Layer on the Initially Smooth Surface // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. Paper 012140.
7. *Афанасьев В.Н., Трифонов В.Л., Гетья С.И., Кон Дехай.* Выступ в турбулентном пограничном слое // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 10. <http://www.techomagelpub.ru/jour/article/view/1312>
8. *Fouladi F., Henshaw P., Ting D.S.-K., Steve Ray.* Flat Plate Convection Heat Transfer Enhancement via a Square Rib // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 104. P. 1202.
9. *Ларичкин В.В., Яковенко С.Н.* Влияние толщины пограничного слоя на структуру пристенного течения с двумерным выступом // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 3. С. 76.
10. *Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.* Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 206 с.
11. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках / Под ред. Терехова В.И. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 247 с.
12. *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. V. 46. P. 4535.
13. *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 Transfer. 2012. V. 55. P. 726.
14. *Wang L., Sunden B.* Experimental Investigation of Local Heat Transfer in a Square Duct with Various-Shaped Ribs // Heat Mass Transfer. 2007. V. 43. P. 759.
15. *Ligrani P.* Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling // Int. J. Rotating Mach. 2013. V. 2013. № 275653. 32 p.
16. *Ji W.T., Jacobi A.M., He Y.L., Tao W.Q.* Summary and Evaluation on Single-Phase Heat Transfer Enhancement Techniques of Liquid Laminar and Turbulent Pipe Flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 88. P. 735.
17. *Молочников В.М., Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Паерелий А.А.* Гидродинамические и тепловые процессы в отрывных течениях за препятствиями при организации пристенных струй // Изв. РАН. Энергетика. 2008. № 1. С. 137.
18. *Nagano Y., Hattori H., Houra T.* DNS of Velocity and Thermal fields in Turbulent Channel Flow with Transverse-Rib Roughness // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. V. 25. P. 393.
19. *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. V. 34. P. 165.
20. *Panigrahi P.K., Schröder A., Kompenhan J.* PIV Investigation of Flow Behind Surface Mounted Permeable Ribs // Exp. Fluids. 2006. V. 40. P. 277.
21. *Huang J.J., Liou T.M.* Heat Transfer Augmentation in Rectangular Channel with Slit Rib-Turbulators on Two Opposite Walls // J. Turbomach. 1997. V. 119. P. 617.
22. *Huang J.J., Liou T.M.* Augmented Heat Transfer in a Rectangular Channel with Permeable Ribs Mounted on the Wall // J. Heat Transfer. 1994. V. 116. P. 912.
23. *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. V. 37. P. 701.
24. *Liou T.M., Yang C.P., Lee H.L.* LDV Measurements of Spatially Periodic Flows Over a Detached Solid-Rib Array // ASME J. Heat Transfer. 1997. V. 119. P. 383.
25. *Tisa J.P., Huang J.J.* Measurements of Heat Transfer and Fluid Flow in a Rectangular Duct with Alternate Attached-Detached Rib-Arrays // Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. V. 42. P. 2071.
26. *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 Transfer. 1998. V. 41. P. 1795.
27. *Ahn J., Lee J.S.* Large Eddy Simulation of Flow and Heat Transfer on a Channel with a Detached Rib Array // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 445.
28. *Терехов В.И., Богатко Т.В.* Структура отрывного течения и теплообмен при турбулентном обтекании отсоединенной диафрагмы в круглой трубе // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 2. С. 57.
29. *Liu H.C., Wang J.H.* Numerical Investigation on Synthesical Performances of Fluid Flow and Heat Transfer of Semiattached Rib-Channels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2011. V. 54. P. 575.
30. *Мугай В.К.* Повышение эффективности теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.
31. *Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А.* Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
32. *Исаев С.А., Ватин Н.И., Гувернюк С.В., Гагарин В.Г., Басок Б.И., Жукова Ю.В.* Снижение лобового сопротивления энергоэффективного высотного сооружения с помощью дроселирующего эффекта с отбором ветровой энергии // ТВТ. 2015. Т. 53. № 6. С. 918.
33. *Афанасьев В.Н., Трифонов В.Л.* Интенсификация теплоотдачи при вынужденной конвекции. М.: Изд-во МГТУ, 2007. 68 с.
34. *Jorgensen F.E.* How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometers – A Practical Guide. Skovlunde: Dantec Dynamics, 2002. 73 p.
35. *Moffat R.J.* Describing the Uncertainties in Experimental Results // Exp. Therm. Fluid Sci. 1988. V. 1. P. 3.