

DOI: 10.18721/JPM.13308
УДК 532.5.013.13:532.526

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю.С. Чумаков, Е.Ф. Храпунов, А.Д. Малых

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе описываются результаты экспериментального исследования свободноконвективного пограничного слоя на вертикальной нагретой поверхности, причем особое внимание уделяется изучению зоны ламинарно-турбулентного перехода, определению границ этой зоны. Основная цель данного исследования – найти возможность управления процессами перехода, воздействуя на них различными крупномасштабными препятствиями, расположенными в области ламинарного участка пограничного слоя. Генератором свободноконвективного потока служила вертикальная алюминиевая пластина шириной 90 см и высотой 4,95 м. На основании полученных результатов можно с уверенностью утверждать, что с помощью крупномасштабных препятствий удается заметно сократить протяженность зоны перехода и тем самым приблизить начало области с развитым турбулентным теплообменом к передней кромке поверхности. Таким образом, препятствия можно рассматривать как пассивные элементы для управления интенсивностью теплообмена.

Ключевые слова: свободная конвекция, ламинарно-турбулентный переход, теплообмен, свободноконвективный пограничный слой, экспериментальное исследование

Ссылка при цитировании: Чумаков Ю.С., Храпунов Е.Ф., Малых А.Д. Экспериментальное исследование влияния крупномасштабных возмущений на ламинарно-турбулентный переход в свободноконвективном слое на вертикальной поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 108–118. DOI: 10.18721/JPM.13308

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

THE EFFECT OF LARGE-SCALE DISTURBANCES ON THE LAMINAR-TURBULENT TRANSITION IN A FREE-CONVECTIVE LAYER ON A VERTICAL SURFACE: AN EXPERIMENTAL STUDY

Yu.S. Chumakov, E.F. Khrapunov, A.D. Malykh

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The results of an experimental study of a free convective boundary layer on a vertical heated surface are presented in this paper. Particular attention has been paid to investigation of the laminar-turbulent transition zone and determination of the zone boundaries. The main goal of the present work was to find the opportunity of the transition processes' control by using various large-scale obstacles located in the region of the laminar section of the boundary layer. A vertical aluminum plate 90 cm wide and 4.95 m high served as a free-convection flow generator. Based on the obtained results, it is safe to state that there is a possibility of a significant reduction in the length of the transition zone through the use of large-scale obstacles. This way permits the beginning of the region with developed

turbulent heat transfer to be moved nearer to the front edge of the surface. Thus, these obstacles can be considered as passive elements for controlling the heat transfer intensity.

Keywords: natural convection, laminar-turbulent transition, heat transfer, natural convective boundary layer, experimental study

Citation: Chumakov Yu.S., Khrapunov E.F., Malykh A.D., The effect of large-scale disturbances on the laminar-turbulent transition in a free-convective layer on a vertical surface: an experimental study, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (3) (2020) 108–118. DOI: 10.18721/JPM.13308

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Исследованию особенностей развития вынужденно-конвективного пограничного слоя под действием различного рода внешних факторов посвящено довольно много работ. Обнаружено, в частности, что в случае малой интенсивности внешних возмущений не удастся заметно повлиять на переходные процессы в пограничном слое. Резкого ускорения развития нестационарных процессов и турбулизации пристенного слоя можно добиться с помощью крупномасштабных трехмерных препятствий (так называемые элементы макрошероховатости), располагая их в области ламинарного участка пограничного слоя. Подобные макрошероховатости широко используются для управления ламинарно-турбулентным переходом (далее ЛТП) в вынужденно-конвективных течениях. Например, их применяют с целью получения относительно толстого пограничного слоя в ландшафтных аэродинамических трубах для моделирования процессов обтекания различных объектов приземным пограничным слоем [1].

Если для вынужденно-конвективных течений можно считать, что накоплен достаточно большой опыт численного и физического моделирования способов управления ЛТП с помощью элементов макрошероховатости, то применительно к свободноконвективным течениям подобных работ очень мало. Так например, результаты прямого численного моделирования турбулентности, развивающейся в свободноконвективном слое за макровыступами, представлены пока только в работе [2], а результаты физи-

ческого моделирования нам вообще неизвестны. Хотя вполне естественно предполагать, что, создавая соответствующие условия для внезапного, «триггерного» возбуждения турбулентности в пограничном слое, можно существенно сократить область ЛТП, протяженность которого, при отсутствии возмущений, в два-три раза превышает протяженность ламинарного участка пограничного слоя [3 – 5]. В свою очередь, сокращая протяженность области ЛТП, мы увеличиваем протяженность области турбулентного теплообмена, и тем самым увеличивается интенсивность теплообмена в целом.

В настоящей работе описываются результаты экспериментального исследования зоны ЛТП в свободноконвективном пограничном слое около вертикальной нагретой пластины, на поверхности которой расположен поперечный ряд крупномасштабных трехмерных выступов, возмущающих исходно ламинарный слой. Для сравнения приводятся также данные измерений, полученные в случае гладкой пластины.

Постановка задачи

Основная цель данного исследования заключалась в изучении возможности управления процессами перехода в свободноконвективном пограничном слое, путем воздействия на него различными крупномасштабными препятствиями, расположенными в области ламинарного участка пограничного слоя.

В качестве препятствий использовались пластинки толщиной 8 мм двух видов: прямоугольного сечения 32×18 мм и трапециевидного сечения высотой 18 мм, у которого

нижнее основание имело длину 32 мм, а верхнее – 16 мм. Препятствия приклеивались к пластине поперек вертикальной оси на расстоянии 200 мм от нижней кромки пластины с шагом 32 мм. Схематичное изображение пластинок, а также фотография препятствий, установленных на нагреваемой поверхности, представлены на рис. 1.

Высота препятствий H выбиралась исходя из оценки толщины невозмущенного ламинарного пограничного слоя в том месте, где предполагалось установить препятствие. Толщину пограничного слоя δ (м) можно оценить по известной полуэмпирической формуле [6] для воздуха:

$$\delta = 4,23 \left(\frac{v^2 \cdot X}{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Pr} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

где v , м²/с, – кинематический коэффициент вязкости; X , м, – продольная координата; g , м/с², – ускорение свободного падения; β , К⁻¹, – коэффициент термического расширения среды; $\Delta T = T_w - T_\infty$, К, – характерный перепад температур (T_w , T_∞ – температура поверхности пластины и температура на внешней границе пограничного слоя, соответственно); Pr – число Прандтля.

При $X = 200$ мм толщина слоя $\delta = 13$ мм, а

отношение высоты препятствия H к толщине слоя равно $H/\delta = 1,4$, т.е. препятствие слегка выступает за пределы пограничного слоя. Отметим, что все параметры, зависящие от температуры, в этой формуле и далее по тексту определяются по указанным ниже термическим условиям, включающим и характерный перепад температур ΔT .

Краткая характеристика экспериментального стенда и методики измерений

Генератором свободноконвективного потока служит вертикальная алюминиевая пластина шириной 90 см и высотой 4,95 м. С обратной стороны пластины находятся 25 нагревателей, работой которых управляет электронная система, способная поддерживать заданный тепловой режим длительное время (6 – 8 ч). Задавая определенный режим работы каждой из 25 секций, можно моделировать различные законы нагрева поверхности по ее высоте и, в частности, режим постоянной температуры. Благодаря большой высоте пластины удастся реализовать три режима течения: ламинарный, переходный и развитый турбулентный, вплоть до значений чисел Грасгофа $Gr = 4,5 \cdot 10^{11}$. Подробное описание экспериментального стенда приведено в работах [5, 7].

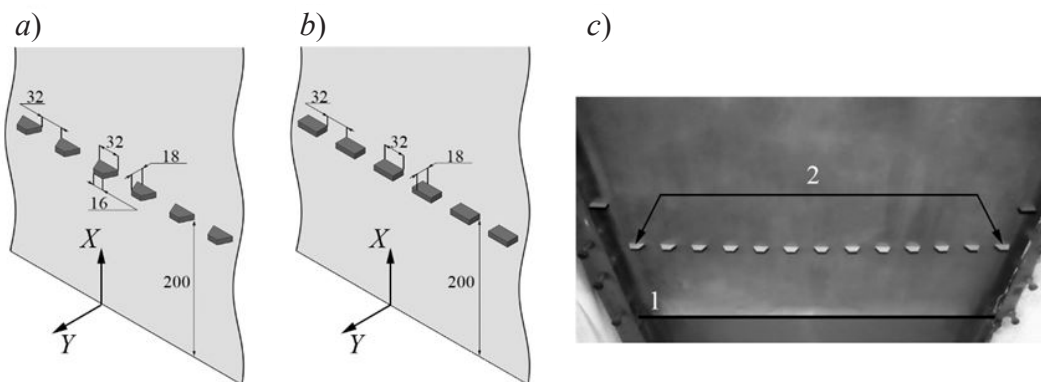


Рис. 1. Схемы трапециевидных (а) и прямоугольных (б) элементов, а также фотография нагреваемой пластины (с), на которой видны ее грань (1) и препятствия – трапециевидные элементы (2).

На схемах даны расстояния в мм



В процессе эксперимента измерялись осредненные и пульсационные составляющие температуры и продольной компоненты вектора скорости. Все измерения производились с помощью термометра сопротивлений и термоанемометра (ТА).

Измерительный зонд состоит из двух датчиков, в которых чувствительными элементами служат вольфрамовые проволочки диаметром 5 мкм и длиной 3 – 4 мм. Проволочки обоих датчиков располагаются параллельно друг другу, на расстоянии 2 мм, и параллельно поверхности, причем нижний датчик (по отношению к течению – вверх по потоку) измеряет актуальную температуру, а верхний датчик (после соответствующей обработки первичных данных) измеряет актуальную скорость.

Известно, что при использовании ТА для измерения скорости в неизотермическом потоке, необходимо учитывать значения температуры при расшифровке показаний ТА. Для рассматриваемого течения, которое характеризуется небольшими средними скоростями и большим уровнем степени турбулентности, обычно используется метод термокомпенсации по средней температуре, который, однако, может привести к неточным измерениям скорости.

В данной работе использовался метод термокомпенсации, описанный в работе [8]. Не останавливаясь на подробном описании этого метода, отметим лишь, что в отличие от других способов термокомпенсации по средней температуре, в данном методе показание ТА, соответствующее актуальной скорости в данной точке пространства, расшифровывается с учетом актуальной температуры в этой же точке.

Все измерения производились при постоянной температуре поверхности $T_w = 60,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$, при этом температура воздуха на внешней границе пограничного слоя T_∞ за все время эксперимента изменялась в пределах от 24 до 26 °С.

Для перемещения датчика в пространстве пограничного слоя использовалось координатное устройство, обеспечивающее

точность перемещения порядка 1 мм по вертикальной (продольной) координате X , а по нормальной к поверхности координате Y (т.е. поперек пограничного слоя) – около 1 мкм, причем перемещение по нормальной координате осуществлялось дистанционно, в автоматическом режиме. Используемая система координат представлена на рис. 1.

Измерение параметров потока в каждом сечении пограничного слоя происходило полностью автоматически.

Последовательность действий при измерении описывается следующим образом.

1. Перемещение зонда (с точностью до 1 мм) в выбранное сечение по продольной координате X (см. рис. 1).

2. Автоматический подвод зонда к поверхности до момента касания.

3. После остановки движения зонд отодвигается от поверхности на расстояние 0,6 мм (с точностью до 1 мкм).

4. Зонд готов к проведению измерений в автоматическом режиме вдоль нормальной координаты Y с заданным шагом.

5. В каждой точке практически одновременно (с интервалом 10^{-5} с) снимаются показания с обоих датчиков зонда, и подобные измерения повторяются с заданной частотой (100 Гц). Обычно производилось 2 тыс. выборок пар показаний; таким образом, время одного измерения составляло 20 с.

После соответствующей обработки данных получаем запись актуальных значений температуры и скорости в заданной точке. Далее, после выполнения операции осреднения, вычисляем средние значения скорости, температуры и интенсивности пульсаций.

Сравнительный анализ результатов

Влияние препятствий на ламинарно-турбулентный переход изучалось путем сравнения результатов измерения осредненных и пульсационных характеристик температурного и скоростного полей в пристенной области пограничного слоя. Результаты подробного исследования свободноконвективного пограничного слоя без возмущений представлены в работах [3 – 5, 9, 10]. В этих работах отмече-

ны основные особенности ЛТП, в частности образование локального максимума средней скорости и интенсивности ее пульсаций, а также интенсивности пульсаций температуры в конце зоны перехода.

В более ранних работах предполагалось, что продольную координату X максимальных значений интенсивности пульсаций можно считать началом развитого турбулентного пограничного слоя. Однако анализ полей актуальных значений температуры и скорости показывает, что коэффициент перемежаемости в области максимальных значений интенсивности пульсаций составляет примерно 0,65 – 0,75, что свидетельствует лишь о нарастании интенсивности процесса перехода. И только ниже по потоку относительно координаты максимума, когда интенсивность пульсаций немного уменьшается и практически не изменяется с увеличением продольной координаты, можно считать, что ЛТП закончился и течение в пограничном слое перешло в стадию развитого турбулентного режима. Коэффициент перемежаемости в этой зоне достигает значений 0,80 – 0,95.

Основные выводы, полученные в предыдущих исследованиях [3 – 5, 9, 10], легли в основу выбора критериев, по которым можно судить о протяженности области ЛТП и тем самым определить начало развитого турбулентного режима в свободноконвективном пограничном слое.

На приводимых ниже графиках все результаты для течения без вводимых возмущений (вариант В1) будут обозначаться кружками, при наличии возмущений в виде прямоугольных выступов (вариант В2) – квадратами, а для возмущений в виде трапециевидальных выступов (вариант В3) – треугольниками.

Аналізу подвергались максимальные значения следующих безразмерных характеристик течения:

(i) интенсивностей пульсаций температуры IT_m ,

$$IT_m = \left(\sqrt{t^2} / \Delta T \right)_{\max}, \quad (2)$$

где T_m , К, – максимальное значение температуры в данном сечении пограничного слоя; t , К, – пульсационная составляющая актуальной температуры;

(ii) интенсивностей пульсаций скорости IU_m ,

$$IU_m = \left(\sqrt{u^2} / U_b \right)_{\max}, \quad (3)$$

где U_m , м/с, – максимальное значение скорости в данном сечении пограничного слоя; u , м/с, – пульсационная составляющая продольной компоненты актуальной скорости; U_b , м/с, – скорость плавучести, определяемая соотношением $U_b = (g\beta\Delta Tv)^{1/3}$;

(iii) безразмерной средней скорости U_m/U_b в данном сечении по координате X .

В настоящей работе не ставилась цель провести измерения полных профилей характеристик пограничного слоя. Измерялась только пристенная часть профиля, и этого было достаточно для объективной оценки максимальных значений обозначенных характеристик в данном сечении по продольной координате X .

На рис. 2 представлены распределения максимальных значений интенсивности пульсаций температуры IT_m по значениям локального числа Грасгофа, а также по размерной координате X для трех рассматриваемых вариантов препятствий. При вычислении числа Грасгофа теплофизические свойства воздуха брались при средней температуре, равной $(T_w + T_\infty)/2$. Исключением являлось значение коэффициента термического расширения, который оценивали при внешней температуре. Число Грасгофа определяется соотношением

$$Gr_x = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot X^3}{\nu^2}. \quad (4)$$

Анализ данных, полученных для варианта В1, позволил выделить следующие особенности:

плавное нарастание интенсивности пульсаций IT_m вплоть до максимального значения при $X \approx 1000$ мм ($Gr_x \approx 4,9 \cdot 10^9$);

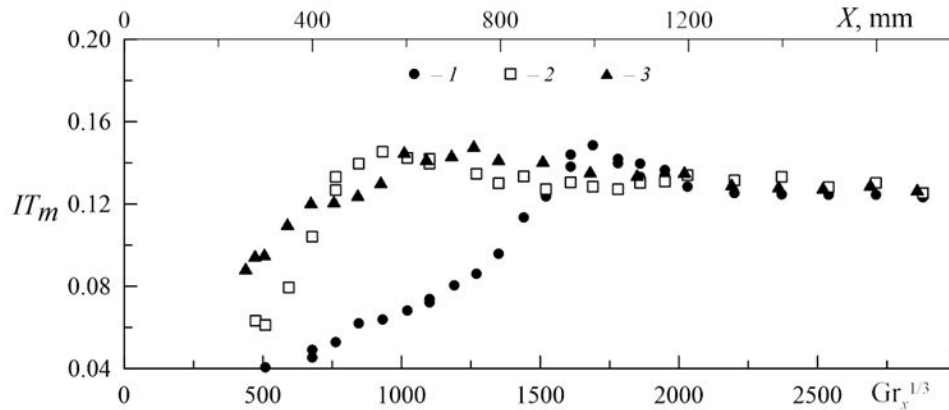


Рис. 2. Зависимости максимальных значений интенсивности пульсаций температуры IT_m в сечении поперек слоя от локального числа Грасгофа Gr_x для трех вариантов препятствий (номера кривых соответствуют номерам вариантов)

затем наблюдается небольшое уменьшение IT_m и, начиная с $X \approx 1200$ мм ($Gr_x \approx 8,4 \cdot 10^9$) значения IT_m практически не меняются.

Анализ результатов, полученных для вариантов В2 и В3, позволяет сделать следующие выводы:

можно заметить, что до $X \approx 450$ мм ($Gr_x \approx 4,4 \cdot 10^8$) скорость роста IT_m для варианта В2 примерно на 20 % больше соответствующей скорости для варианта В3. Затем, начиная с $X \approx 500$ мм ($Gr_x \approx 6,1 \cdot 10^8$), значения пульсаций IT_m , наблюдаемые в варианте В3, резко возрастают и при $X \approx 550$ мм ($Gr_x \approx 8,1 \cdot 10^8$) достигают максимального значения. В свою очередь, пульсации IT_m в варианте В2 достигают максимального значения только при $X \approx 750$ мм ($Gr_x \approx 2,0 \cdot 10^9$);

при дальнейшем увеличении значений координаты X (локального числа Грасгофа) значения интенсивности пульсаций температуры при двух вариантах В2 и В3 сближаются и, начиная с $X \approx 1200$ мм ($Gr_x \approx 8,4 \cdot 10^9$), объединяются с IT_m варианта В1, выходя на почти постоянное значение.

На рис. 3 представлены распределения максимальных значений пульсаций скорости IU_m вдоль пластины для трех рассматриваемых вариантов. Анализ представленных данных показал следующее:

начиная с $X \approx 300$ мм ($Gr_x \approx 1,3 \cdot 10^8$), интенсивность пульсаций IU_m в обоих вариантах с возмущениями (В2 и В3) существенно

превосходит интенсивность IU_m для случая отсутствия возмущений. Причем в варианте В2 наблюдается стремительный рост интенсивности IU_m , а максимальные значения IU_m достигаются при $X = 500$ мм ($Gr_x \approx 6,1 \cdot 10^8$);

интенсивности IU_m вариантов В3 и В1 увеличиваются почти одинаково вплоть до $X \approx 650$ мм ($Gr_x \approx 1,3 \cdot 10^9$), затем IU_m в варианте В3 начинает уменьшаться, а интенсивность пульсации в варианте В1 растет, достигая максимального значения при $X \approx 950$ мм ($Gr_x \approx 4,2 \cdot 10^9$);

при дальнейшем увеличении значений координаты X (локального числа Грасгофа) значения интенсивности IU_m , в трех вариантах сближаются, достигая при $X \approx 1400$ мм ($Gr_x \approx 1,3 \cdot 10^{10}$) одинаковых значений.

На рис. 4 представлены распределения максимальных значений безразмерной средней скорости U_m/U_b по значениям числа Грасгофа. Анализ представленных данных показал следующее:

в начале пограничного слоя ($X \approx 300$ мм, или $Gr_x \approx 1,3 \cdot 10^8$) значения максимальной скорости U_m/U_b для трех вариантов распределены соответственно сопротивлениям, которые возмущения (препятствия) оказывают развитию течения. Так, самым большим сопротивлением обладает вариант В3, для которого значение скорости U_m/U_b монотонно увеличивается на протяжении всего участка наблюдения. В то же время скорость

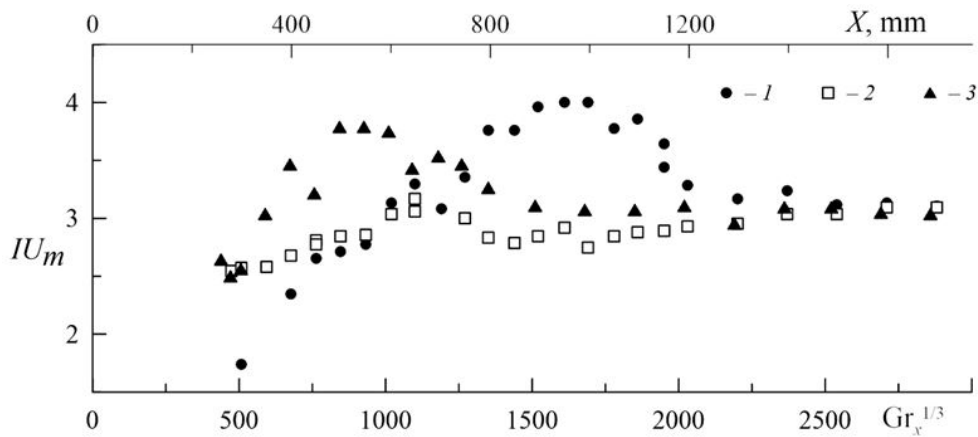


Рис. 3. Зависимости максимальных значений интенсивности пульсаций скорости IU_m в сечении поперек слоя от локального числа Грасгофа Gr_x для трех вариантов препятствий (номера кривых соответствуют номерам вариантов)

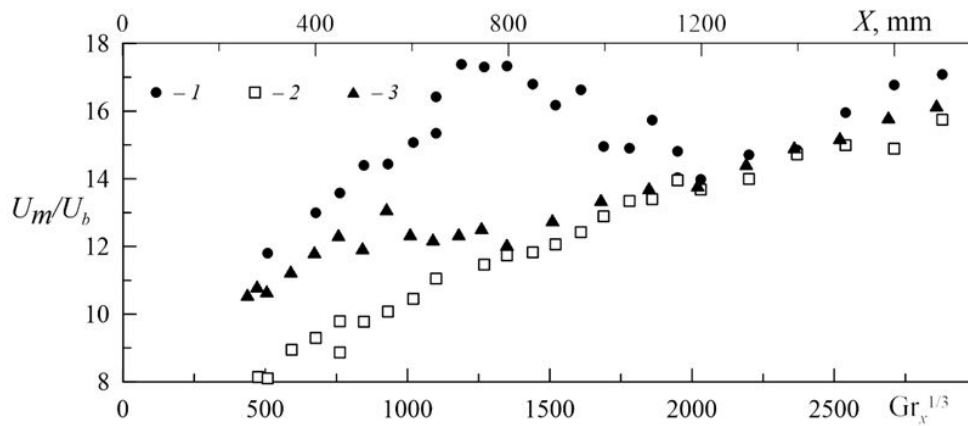


Рис. 4. Зависимости максимальных значений безразмерной средней скорости U_m/U_b в сечении поперек слоя от локального числа Грасгофа Gr_x для трех рассматриваемых вариантов (номера кривых соответствуют номерам вариантов)

U_m/U_b вариантов В2 и В1 увеличивается практически одинаково вплоть до координаты $X \approx 400$ мм ($Gr_x \approx 3,1 \cdot 10^8$). Затем скорость U_m/U_b варианта В2 все же отклоняется от значений варианта В1, начиная терять темп роста скорости, и на расстоянии $X \approx 900$ мм ($Gr_x \approx 3,5 \cdot 10^9$) сливается с кривой варианта В3;

как и следовало ожидать, в варианте В1 скорость U_m/U_b довольно уверенно достигает максимального значения при $X \approx 850$ мм ($Gr_x \approx 2,3 \cdot 10^9$) и далее, медленно уменьшаясь, сливается с кривыми двух других вариантов при $X \approx 1200$ мм ($Gr_x \approx 8,4 \cdot 10^9$).

Прежде чем переходить к анализу результатов по теплообмену, кратко опишем процедуру определения локального коэффициента теплообмена α (Вт/(м²·К)) и, в конечном итоге, числа Нуссельта Nu_x , выражаемого как

$$Nu_x = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda}, \quad (5)$$

где λ , Вт/(м·К), – коэффициент теплопроводности.

Процедура основана на методике, предложенной в работах [3 – 5]. Согласно этой методике, существует пристенный тонкий

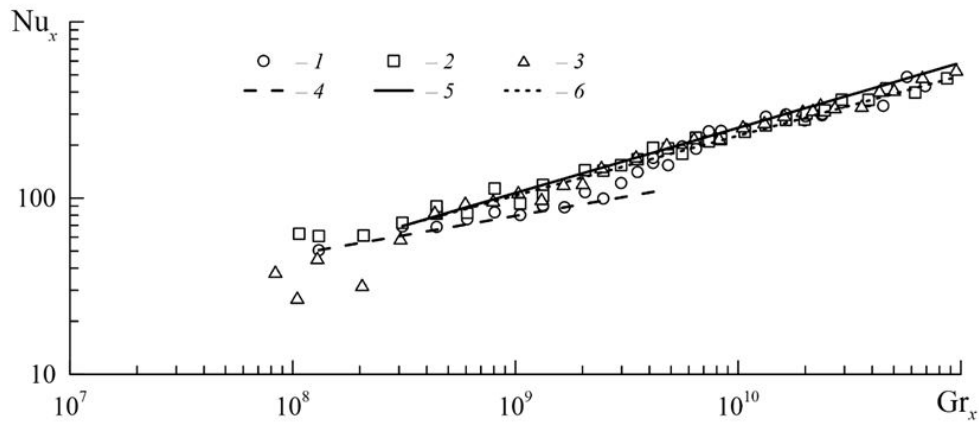


Рис. 5. Зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа для трех вариантов препятствий (первые номера кривых соответствуют номерам вариантов), а также выделены участки кривых 4 – 6: 4 – $Nu_x^{lam} = 0,83 Gr_x^{0,22}$; 5 – $Nu_x = 0,05 Gr_x^{0,37}$; 6 – $Nu_x = 0,09 Gr_x^{0,34}$

теплопроводный слой, в котором профиль осредненной температуры линейно зависит от нормальной координаты Y . На этом основании тепловой поток q_w от поверхности можно представить в следующем виде:

$$q_w = -\lambda \cdot (\partial T / \partial Y)|_w = \alpha \cdot \Delta T. \quad (6)$$

Следовательно, локальный коэффициент теплообмена α можно легко вычислить, если производную определить графически по экспериментальному профилю температуры.

Степень влияния возмущений на процесс перехода от ламинарного режима течения к турбулентному хорошо прослеживается по изменению процесса теплообмена в этой области. На рис. 5 представлены зависимости числа Нуссельта Nu_x от локального числа Грасгофа Gr_x для варианта без возмущений (В1) и двух вариантов с возмущениями (В2 и В3).

Для варианта В1 отчетливо выделяются две области: ламинарная и турбулентная – участки пограничного слоя с соответствующими законами теплообмена:

$$Nu_x^{lam} = 0,83 \cdot Gr_x^{0,22};$$

$$Nu_x^{turb} = 0,07 \cdot Gr_x^{0,35}.$$

Кроме того, можно отметить довольно большую протяженность области ЛТП ($Gr_x \in (2-10) \cdot 10^9$). Для обоих вариантов с возмущением вверх по потоку за препятствиями наблюдается полное отсутствие ламинарной области. Более того, практически сразу за препятствиями начинается область с характерными для турбулентного режима течения законами теплообмена. Так, для варианта В2 это соотношение $Nu_x = 0,05 \cdot Gr_x^{0,37}$, а для варианта В3 – это $Nu_x = 0,09 \cdot Gr_x^{0,34}$.

Заключение

На основании представленных в статье данных можно с уверенностью утверждать, что с помощью крупномасштабных препятствий удастся заметно сократить протяженность зоны перехода в свободноконвективных пограничных слоях и тем самым приблизить начало области с развитым турбулентным теплообменом к передней кромке обтекаемой поверхности. В прикладном отношении, подобного рода препятствия можно рассматривать как пассивные элементы для управления интенсивностью теплообмена.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №18-19-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Irwin H.P.A.H.** The design of spires for wind simulation // *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 1981. Vol. 7. No. 3. Pp. 361–366.
2. **Smirnov E.M., Abramov A.G., Smirnovsky A.A., Smirnov P.E.** Numerical simulation of turbulence arising in the free convection boundary layer after across row of rectangular obstacles // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1128. P. 012090.
3. **Tsuji T., Nagano Y.** Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1988. Vol. 31. No. 8. Pp. 1723–1734.
4. **Chumakov Yu.S., Kuzmitsky V.A.** Surface shear stress and heat flux measurements on a vertical heated plate under free convection heat transfer // *Russian Journal of Engineering Thermophysics (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН)*. 1998. Vol. 8. No. 1–4. Pp. 1–15.
5. **Кузьмицкий В.А., Чумаков Ю.С.** Анализ характеристик течения при ламинарно-турбулентном переходе в свободноконвективном пограничном слое // *Теплофизика высоких температур*. 1999. Т. 37. № 2. С. 239–246.
6. **Попов И.А.** Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена: монография. Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.
7. **Чумаков Ю.С., Левченя А.М., Храпунов Е.Ф.** Экспериментальное исследование течения в зоне влияния цилиндра, погруженного в свободноконвективный пограничный слой на вертикальной поверхности // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2020. Т. 13. № 1. С. 66–77.
8. **Кузьмицкий В.А., Чумаков Ю.С.** Установка для калибровки термоанемометра при малых скоростях в неизотермической воздушной среде // *Теплофизика высоких температур*. 1995. Т. 33. № 1. С. 116–120.
9. **Никольская С.Б., Чумаков Ю.С.** Экспериментальное исследование пульсационного движения в свободноконвективном пограничном слое // *Теплофизика высоких температур*. 2000. Т. 38. № 2. С. 249–256.
10. **Tsuji T., Nagano Y.** Turbulence measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1988. Vol. 31. No. 10. Pp. 2101–2111.

Статья поступила в редакцию 25.06.2020, принята к публикации 27.07.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧУМАКОВ Юрий Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
chumakov@yahoo.com

ХРАПУНОВ Евгений Федорович – аспирант Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
hrapunov.evgenii@yandex.ru

МАЛЫХ Анастасия Денисовна – студентка магистратуры Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
anfatneva@yandex.ru

REFERENCES

1. **Irwin H.P.A.H.**, The design of spires for wind simulation, *J. Wind Engin. Ind. Aerod.* 7 (3) (1981) 361–366.
2. **Smirnov E.M., Abramov A.G., Smirnovsky A.A., Smirnov P.E.**, Numerical simulation of turbulence arising in the free convection boundary layer after across row of rectangular obstacles, *J. Phys., Conf. Ser.* 1128 (2018) 012090.
3. **Tsuji T., Nagano Y.**, Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 31 (8) (1988) 1723–1734.
4. **Chumakov Yr.S., Kuzmitsky V.A.**, Surface shear stress and heat flux measurements on a vertical heated plate under free convection heat transfer // *Russian Journal of Engineering Thermophysics.* 8 (1–4) (1998) 1–15.
5. **Kuzmitskii V.A., Chumakov Yu.S.**, Analysis of characteristics of flow under conditions of laminar-to-turbulent transition in a free-convection boundary layer, *High Temperature.* 37 (2) (1999) 217–223.
6. **Popov I.A.**, *Gidrodinamika i teploobmen vnesnkh i vnutrenikh svobodnokonvektivnykh vertikalnykh techeniy s intensivatsiyey* [Hydrodynamics and heat transfer of external and internal vertical free-convective flows with intensification], Tsentr Innovatsionnykh Tekhnologiy, Kazan, 2007. (in Russian)
7. **Chumakov Yu.S., Levchenya A.M., Khrapunov E.F.**, An experimental study of the flow in the area of influence of a cylinder immersed in the free convective boundary layer on a vertical surface, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 13 (1) (2020) 66–77.
8. **Kuzmitskii V.A., Chumakov Yu.S.**, Facility for static calibration of a hot-wire anemometer at low velocities in a nonisothermal air medium, *High Temperature.* 33 (1) (1995) 109–113.
9. **Nikol'skaya S.B., Chumakov Yu.S.**, Experimental investigation of pulsation motion in a free-convection boundary layer, *High Temperature.* 38 (2) (2000) 231–237.
10. **Tsuji T., Nagano Y.**, Turbulence measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate, *Int. J. Heat Mass Transfer.* 31 (10) (1988) 2101–2111.

Received 25.06.2020, accepted 27.07.2020.

THE AUTHORS

CHUMAKOV Yuriy S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
chymakov@yahoo.com

KHRAPUNOV Evgeniy F.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
hrapunov.evgenii@yandex.ru

MALYKH Anastasiya D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

anfatneva@yandex.ru