

А. В. Бильский¹, О. А. Гобызов¹, В. И. Корнилов², Д. М. Маркович^{1,3}

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: bilsky@itp.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВДУВА ВОЗДУХА В ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ*

Экспериментально исследована принципиальная возможность использования методов цифровой трассерной визуализации (PIV) для изучения свойств несжимаемого турбулентного пограничного слоя, модифицированного путем вдува воздуха через мелкоперфорированную проницаемую поверхность. Описана постановка эксперимента, в том числе оптическая схема измерений. Обсуждаются достоинства метода PIV на основе предложенной оптической схемы, представлены полученные этим методом данные, касающиеся снижения трения, изменения пространственной структуры и характеристик турбулентности пограничного слоя под воздействием вдува. Показано, что полученные результаты в целом коррелируют с данными измерений альтернативным методом. Выявлены основные причины имеющихся расхождений.

Ключевые слова: PIV, трассерная визуализация, пульсации скорости, турбулентный пограничный слой, плоская пластина, управление пограничным слоем, поверхностное трение, сопротивление.

Введение

Проблема снижения сопротивления летательных аппаратов и движущихся тел является одной из важнейших задач аэро- и гидродинамики, напрямую связанной с их скоростными характеристиками и энергоэффективностью. В последние десятилетия, кроме поисков экономичного режима поддержания ламинарной формы течения на обтекаемой поверхности, активно ищутся и новые способы уменьшения аэродинамического сопротивления аппаратов, например, за счет разработки пассивных и активных методов управления структурой пристенной турбулентности. Одним из та-

ких подходов, продемонстрировавших свою потенциальную эффективность в ряде недавних исследований [1; 2], является модификация турбулентного пограничного слоя путем вдува с малым расходом газа через проницаемую поверхность в пристенную область течения. В ранних исследованиях этого способа управления было обнаружено, что величина поверхностного трения на пористой поверхности значительно выше, чем на непроницаемой, и получение существенного снижения поверхностного трения требует больших расходов газа [3]. Однако в последнее время было показано, что использование современных материалов и технологий для изготовления проницаемой по-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.132.21.1355.

верхности позволяет получить пористый (в частности, перфорированный) образец, поверхностное трение которого незначительно отличается от соответствующего значения на гидравлически гладкой стенке. Это позволяет добиться значительного снижения поверхностного трения и даже коэффициента полного аэродинамического сопротивления путем вдува сравнительно малого количества газа (микровдува). До настоящего момента изучение возможностей снижения трения путем вдува газа было направлено на улучшение качества пористой поверхности, оптимизацию способов подачи газа и подбор оптимальных параметров вдува, таких, например, как массовый расход, в то время как изменение физических характеристик пограничного слоя – в частности, его пространственной структуры и параметров турбулентности, чаще всего оставалось за рамками исследований.

Цель настоящей работы – применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа свойств турбулентного пограничного слоя на плоской пластине (в том числе распределений турбулентных напряжений), модифицированного с помощью распределенного вдува воздуха через мелкоперфорированную проницаемую стенку. Для того чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к качеству поверхности, в настоящей работе использовался специальный мелкоперфорированный образец толщиной 1,1 мм с равномерным распределением микроотверстий, пористостью около 17 % и диаметром отверстий $0,15 \div 0,17$ мм. Как показала предварительная проверка, поверхностное трение на таком образце отличается от соответствующего значения на гидравлически гладкой поверхности при тех же условиях не более чем на $3 \div 5$ %.

Условия и методика эксперимента

Эксперименты проводились на малой дозвуковой аэродинамической трубе замкнутого типа ИТ СО РАН, имеющей следующие характеристики: рабочий диапазон скоростей потока 0–30 м/с; размеры рабочей части $125 \times 125 \times 1\,000$ мм; степень турбулентности < 2 %.

В качестве объекта исследования использовалась модель плоской пластины с размерами 750×124 мм² в плане и толщиной 6 мм, расположенной горизонтально в рабо-

чей части трубы. Гладкий перфорированный образец, имеющий размеры 120×10 мм в плане, монтировался на расстоянии 420 мм от передней кромки пластины заподлицо с ее поверхностью. Измерения проводились при постоянной скорости набегающего потока 11 м/с и варьируемом в диапазоне от 0 до $5,9 \cdot 10^{-2}$ кг/с/м² расходе воздуха через перфорированную стенку. Подача воздуха в камеру давления, а от нее через проницаемый образец в пограничный слой осуществлялась от воздушного компрессора, снабженного ресивером большого объема, через пневмотрассу. Объем ресивера был достаточным для того, чтобы обеспечивать подачу воздуха в течение всего эксперимента, что позволяло избегать периодического включения компрессора в ходе измерений. В пневмотрассу последовательно были включены: редуктор грубого регулирования, редуктор тонкого регулирования и игольчатый натекатель. Следом за натекателем устанавливался расходомер TSI 4140. Такая система подачи воздуха в камеру давления, расположенную под перфорированным образцом, позволяла поддерживать постоянный расход с точностью $\pm 0,02$ л/мин ($3 \cdot 10^{-4}$ кг/с/м²).

Для регистрации полей скорости и пульсаций скорости применялся специально адаптированный для проведения измерений в пограничном слое метод PIV. Регистрация трассерных картин осуществлялась при помощи измерительного комплекса «ПОЛИС», включавшего в себя двойной импульсный Nd:YAG-лазер, снабженный оптической насадкой для создания тонкого (~ 200 мкм) светового ножа и 11-мегапиксельную ПЗС-камеру «Видеоскан» с установленным на ней длиннофокусным макрообъективом. Управление измерительным комплексом и обработка изображений производились с помощью программного пакета Actual Flow. Более подробно особенности реализации данного метода можно найти в работе [4].

Лазерный нож для подсветки измерительной области формировался при помощи оптической насадки, установленной на апертурной диафрагме лазера. Для того чтобы уменьшить влияние отражений лазерного излучения от поверхности пластины на качество трассерных картин, лазерный нож юстировался параллельно обтекаемой поверхности (рис. 1), что обеспечивало подсветку потока вплоть до стенки при незна-

чительном уровне отраженного света. Зарегистрированные камерой трассерные картины обрабатывались при помощи кросс-корреляционного итерационного алгоритма с непрерывным смещением областей. Для обработки использовалась неанізотропная элементарная расчетная ячейка размером 24×48 пикс², имеющая меньший размер в вертикальном направлении (вдоль оси y), что позволяло получать более высокое пространственное разрешение в этом направлении и тем самым снижать влияние градиента скорости в пристенной области на качество измерений. В результате такой обработки пространственное разрешение измерений составило 55×110 мкм. Для расчета осредненных и статистических характеристик потока полученные описанным выше способом поля скорости усреднялись по 500 парам изображений для каждого заданного в эксперименте значения расхода воздуха.

Результаты экспериментов

Важной частью работы было исследование возможности снижения локальных значений коэффициента поверхностного трения на основе метода PIV. В качестве примера на рис. 2 приведены профили средней скорости, ограниченные начальными значениями координаты y , в зависимости от величины массового расхода вдуваемого воздуха Q . Как видно, в поведении профилей скорости наблюдается вполне определенная тенденция, которая состоит в том, что при малых значениях расхода воздуха заметно устойчивое уменьшение градиента скорости $\partial U / \partial y$ и, следовательно, снижение величины поверхностного трения, а само распределение скорости носит линейный характер. При значениях Q , больших 1,3 л/мин (что соответствует массовому расходу $0,022$ кг/с/м²), форма профиля претерпевает искажения и становится отличной от линейной, хотя и видно, что экспериментальные точки, полученные при этих значениях расхода, лежат ниже точек с меньшим значением расхода воздуха. Изменение формы профиля, вероятнее всего, происходит по причине ухудшения качества трассерных картин, а именно вследствие отщепления частиц от поверхности пластины в результате эффекта вдува.

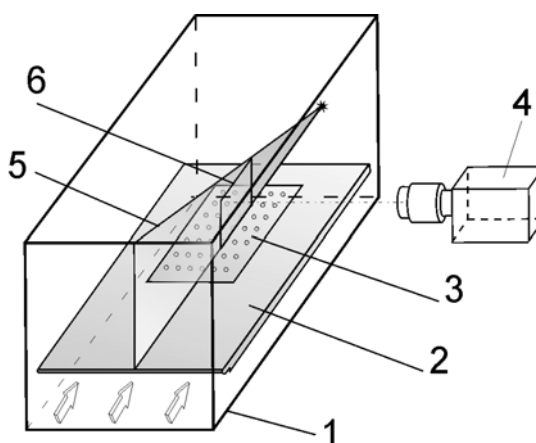


Рис. 1. Схема измерений: 1 – рабочий участок; 2 – плоская пластина; 3 – перфорированный образец; 4 – камера; 5 – лазерный нож; 6 – измерительная область

Таким образом, при расходе воздуха от 0 до 1,3 л/мин использовавшийся метод позволяет с приемлемой точностью измерять значения скорости потока в пристенной области и, как следствие, определять значения поверхностного трения τ_w по наклону профиля средней скорости в непосредственной окрестности стенки. Кроме того, для указанного диапазона расхода воздуха Q обнаружено, что с ростом Q протяженность линейного участка скорости возрастает, что хорошо согласуется с опубликованными в литературе данными, в частности с результатами численного анализа, приведенными в работе [5].

Полученные данные позволили проанализировать эффект снижения поверхностного трения за счет вдува воздуха (рис. 3). Для сравнения здесь показаны также результаты термоанемометрических измерений, выполненных на аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, заимствованные из работ [2; 6]. Нетрудно заметить, что, как и термоанемометрические, результаты измерений независимым методом PIV также указывают на вполне устойчивый характер снижения коэффициента поверхностного трения C_f . При этом можно предположить, что потенциал снижения C_f далеко не исчерпан в том смысле, что с увеличением расхода вдуваемого воздуха может быть достигнуто и большее снижение C_f , однако его измерение методами трассерной визуализации требует засева не только основного потока,

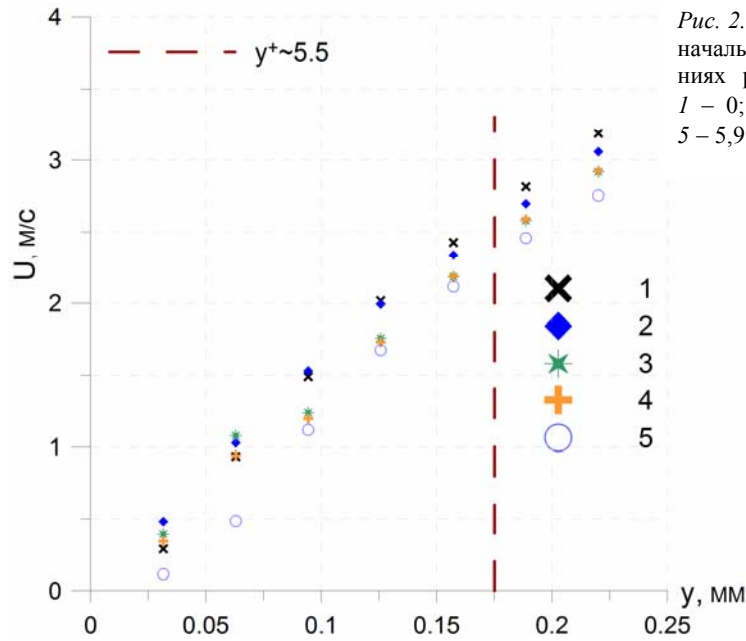


Рис. 2. Профили средней скорости, ограниченные начальной координатой y , при различных значениях расхода вдуваемого воздуха Q [кг/с/м²]: 1 – 0; 2 – $8 \cdot 10^{-3}$; 3 – $1,5 \cdot 10^{-2}$; 4 – $2,2 \cdot 10^{-2}$; 5 – $5,9 \cdot 10^{-2}$

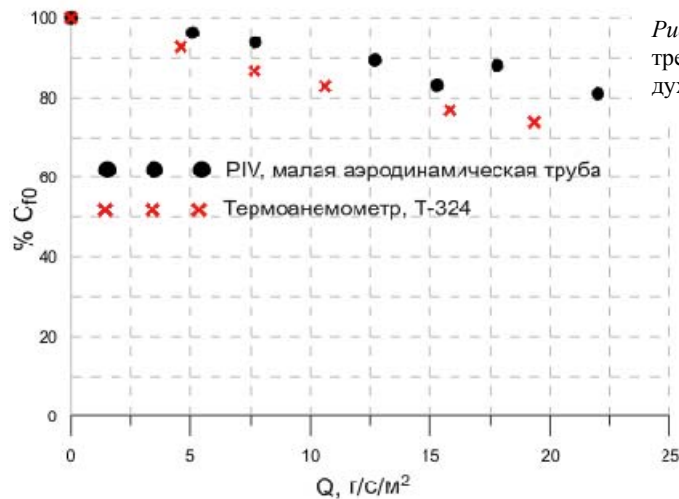


Рис. 3. Изменение коэффициента поверхностного трения в зависимости от массового расхода воздуха, $U_\infty = 11$ м/с, $Re_x = 4,04 \cdot 10^5$

но и микроструй, вдуваемых через перфорированный образец. Следует также отметить, что отличие в данных, полученных разными методами, может быть связано как с различиями в организации тракта для подвода воздуха к перфорированной поверхности и условиями эксперимента, так и с краевыми эффектами, влияние которых, естественно, больше сказывается в случае использования образца малых размеров.

Что касается свойств пространственной структуры пограничного слоя, формирующейся под воздействием вдува, то в ходе измерений удалось показать, что влияние вдува не только оказывается заметным в вязком подслое, но и распространяется так-

же в буферную зону и логарифмическую область пограничного слоя. В качестве примера на рис. 4 представлены экспериментальные профили скорости в переменных внешней области (а) и координатах закона стенки (б) в пограничном слое на перфорированной поверхности, измеренные при различных значениях расхода воздуха. Хотя все изменения в основном ограничиваются внутренней областью пограничного слоя, видно, что в координатах закона стенки изменяется угол наклона профиля скорости. Указанный эффект приводит к тому, что метод Клаузера [7], обычно используемый для определения C_f по профилям скорости в логарифмической области, становится явно

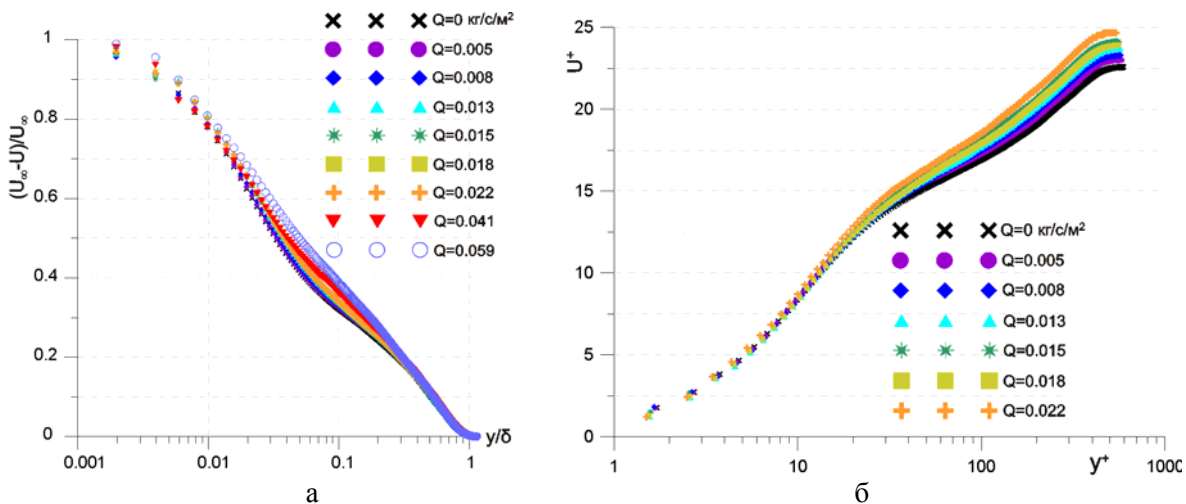


Рис. 4. Изменение профиля средней скорости с расходом воздуха $U_\infty = 11$ м/с, $Re_x = 4,04 \cdot 10^5$

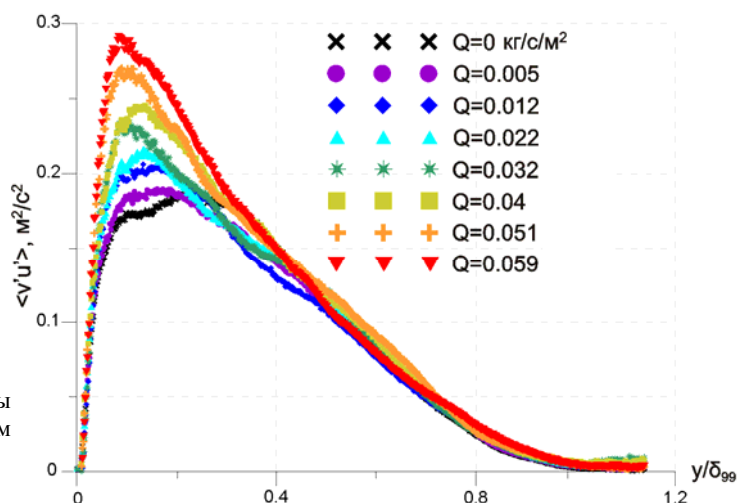


Рис. 5. Изменение профиля компоненты турбулентного трения $\langle u'v' \rangle$ с ростом расхода воздуха $U_\infty = 11$ м/с, $Re_x = 4,04 \cdot 10^5$

неприменимым. В этом случае локальный коэффициент поверхностного трения может быть определен только по линейной части профиля на основе достаточно точных измерений скорости в пристенной части пограничного слоя.

Исследование характеристик турбулентности модифицированного вдувом пограничного слоя также выявило ряд интересных особенностей течения. В частности, зарегистрировано отеснение максимума турбулентных пульсаций скорости от стенки, свидетельствующее об увеличении толщины вязкого подслоя с одновременным

ростом турбулентного касательного напряжения $\langle u'v' \rangle$ по мере увеличения расхода вдуваемого воздуха (рис. 5). Причем наибольшие отклонения пульсационных характеристик течения в сравнении с исходным состоянием наблюдаются в той же области течения (на расстоянии $y = (0,05-0,5)\delta$ от стенки), что и в случае распределения средней скорости.

Особый интерес представляет оценка возможности снижения коэффициента полного аэродинамического сопротивления пластины при наличии вдува воздуха. Такая оценка была выполнена на основе теоремы

импульсов. Как известно, сопротивление трения пластины в сечении x можно определить как

$$W(x) = b\rho \int_0^{\delta} u(U_{\infty} - u)dy,$$

где b – ширина пластины; ρ – плотность воздуха; U_{∞} – скорость невозмущенного потока; u – локальная скорость потока на расстоянии y от поверхности пластины. Имея в виду, что поток несжимаемый, а C_f над поверхностью перфорированного образца снижается на приблизительно одинаковую величину вдоль всей длины образца, и пренебрегая краевыми областями, можно снижение полного аэродинамического сопротивления представить в виде $W_0(x)/W_Q(x)$, где W_0 – сопротивление в отсутствие вдува, а W_Q – сопротивление при текущем расходе вдуваемого воздуха Q . При выполнении оценки профиль скорости интерполировался по экспериментальным точкам при помощи сплайн-функции третьей степени.

Проведенная таким образом оценка показала, что при максимальной интенсивности вдува имеет место снижение интегрального коэффициента аэродинамического сопротивления на величину порядка 4 %. Причем, несмотря на то что вдув воздуха приводит к росту турбулентных касательных напряжений во внутренней области пограничного слоя, эффект снижения поверхностного трения в описанных условиях является доминирующим и приводит к снижению сопротивления пластины. Более полная оценка эффективности данного метода управления пограничным слоем требует учета энергетических затрат на осуществление вдува, что является довольно сложной задачей, решение которой предполагается осуществить в процессе дальнейших исследований.

Заключение

Метод цифровой трассерной визуализации применен для изучения влияния вдува воздуха через мелкоперфорированную поверхность на свойства турбулентного пограничного слоя, формирующегося при обтекании плоской пластины несжимаемым потоком. Получены профили средней скорости и пульсаций скорости потока при различных значениях массового расхода вдуваемого воздуха. Пространственное разрешение измерений, составившее 55×110 мкм,

позволило измерить значения скорости потока в непосредственной окрестности стенки и продемонстрировать наличие устойчивого эффекта снижения коэффициента поверхностного трения C_f при увеличении расхода. Исследования пространственной структуры пограничного слоя выявили ряд изменений профиля средней скорости потока и пульсационных характеристик течения под воздействием вдува. На основании выполненной в работе оценки установлено, что в исследуемых условиях полное сопротивление снижается на величину порядка 4 % при максимальном исследованном массовом расходе воздуха. В целом результаты исследования, проведенного методом PIV, согласуются с представленными в литературе данными термоанемометрических измерений.

За рамками данного исследования остались вопросы влияния вдува воздуха на мгновенную структуру течения, в частности на формирование и развитие когерентных структур в потоке. Требуется также специальное изучение вопроса о влиянии размеров и способа расположения перфорации на эффективность описанного метода управления, который станет предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. *Hwang D.* Skin-Friction Reduction by a Micro-Blowing Technique // AIAA J. 1998. Vol. 36. No. 3. P. 480–481.
2. *Kornilov V. I., Boiko A. V.* Efficiency of Air Microblowing through Microperforated Wall for Flat Plate Drag Reduction // AIAA J. 2012. Vol. 50. No. 3. P. 724–732.
3. *Dershin H., Gallaher W. H., Leonard C. A.* Direct Measurement of Skin Friction on a Porous Flat Plate With Mass Injection // AIAA. Paper 67-194. 1967. Vol. 5. P. 1934–1939.
4. *Бильский А. В., Гобызов О. А., Корнилов В. И., Маркович Д. М.* Применение методов цифровой трассерной визуализации для диагностики турбулентного пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 4. С. 401–414.
5. *Ерошенко В. М., Зайчик Л. И., Климов А. А., Кондратьев В. И., Периуков В. А.* Влияние вдува и отсоса на характеристики вязкого подслоя в турбулентном потоке // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 45, № 2. С. 204–209.

6. Корнилов В. И. Распределение скорости в турбулентном пограничном слое на проницаемой стенке в условиях вдува воздуха // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 1. С. 9–17.

7. Clauser F. H. Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients // J. Aero. Sci. 1954. Vol. 21. P. 91–108.

Материал поступил в редколлегию 07.12.2012

A. V. Bilsky, O. A. Gobysov, V. I. Kornilov, D. M. Markovich

**INVESTIGATION OF INFLUENCE OF AIR BLOWING IN A TURBULENT BOUNDARY LAYER
BY MEANS OF DIGITAL PARTICLE-BASED FLOW VISUALIZATION**

It was experimentally studied the possibility of the digital particle-based flow visualization technique (PIV) of application to investigate the properties of an incompressible turbulent boundary layer modified by air blowing through a microperforated surface. Experimental setup, including the optical measurement system is described. The advantages of the PIV method based on the proposed optical system are discussed. There are also presented the experimental data on the friction reduction and on the changes of the spatial structure and of the turbulence characteristics of the boundary layer under the influence of injection, obtained by this method. It is shown that the results gained generally match the measurements performed by alternative techniques and the basic reasons for the observed discrepancies are revealed.

Keywords: PIV, particle-based visualization, velocity pulsations, turbulent boundary layer, flat plate, boundary layer control, skin friction, drag.