

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 532.574.7+532.526.4+532.526.72+532.546.6

А.В. Бильский, О.А. Гобызов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090,
г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, E-mail: oleg.a.g.post@gmail.com*

**ДИАГНОСТИКА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МЕТОДОМ
АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ**

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена подходам для измерения полей скорости и пульсаций скорости в несжимаемом турбулентном пограничном слое методом анемометрии по изображениям частиц. Рассмотрены особенности выполнения измерений в области течения, формирующейся вблизи обтекаемой поверхности, представлено описание оптической схемы измерений и способов засева потока трассерами. Анализируются результаты измерения полей скорости в пограничном слое на модели плоской пластины. Отдельно рассматриваются сравнительные данные, характеризующие эффективность применения различных алгоритмов обработки трассерных картин. Приводятся результаты применения описанных подходов для анализа пограничного слоя, модифицированного путем вдува воздуха через мелкоперфорированную поверхность.

PIV, PTV, ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ, ПЛОСКАЯ ПЛАСТИНА, ВДУВ ВОЗДУХА, УПРАВЛЕНИЕ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ, ТЕРНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ

Важность изучения свойств пристенного течения для практических приложений, в частности, для решения задач, связанных с управлением турбулентным пограничным слоем продолжает оставаться одной из актуальных проблем современной прикладной гидроаэродинамики. Многие статистические характеристики равновесного турбулентного пограничного слоя в настоящее время хорошо изучены и могут быть определены в рамках известных полуэмпирических соотношений. В то же время исследование течения в переходном состоянии или в неканонических условиях возможно только экспериментальными методами или при помощи прямого численного моделирования. В связи с этим актуальной остается также и разработка, применение и совершенствование оптических методов измерения полей скорости в качестве инструмента для диагностики пограничных слоев. К настоящему моменту опубликован обширный материал, касающийся применения различных модификаций основанных на слежении за частицами методов, таких как планарный PIV, Stereo-PIV, Томо-PIV, PTV, для диагностики пограничного слоя. В большинстве таких работ речь идет об измерении полей скорости на существенном удалении от стенки – во внешней области пограничного слоя, или, в отдельных случаях – начиная от буферной зоны ($y^+ > 30$). Так, в частности, в работах [1, 2] проводится сравнение результатов измерений трехкомпонентных полей скорости в безградиентном турбулентном пограничном слое методом Stereo-PIV с результатами термоанемометрических измерений и прямого

численного моделирования. В обеих работах продемонстрировано хорошее соответствие результатов измерения полей средней скорости методом PIV данным, полученным другими методами. При этом в буферной области ($5 < y^+ < 30$) и вязком подслое ($y^+ < 5$) из-за недостаточного пространственного разрешения оптических методов наблюдается систематическое завышение значений средней скорости, достигающее в отдельных точках (при приближении к стенке) 100 % и более. В работе [3] показано, что с уменьшением размера элементарной расчетной ячейки расхождение экспериментальных и расчетных кривых происходит при меньших значениях y^+ . Отдельно следует упомянуть работу [4], в которой анализируется способ измерения полей средней скорости с использованием микроскопа с большим рабочим расстоянием и применением алгоритма обработки изображений, основанного на расчете осредненных двухточечных корреляций. Кроме того, в указанной работе рассматриваются и характерные для оптических методов измерения полей скорости источники погрешности. Предложенный авторами этой работы способ позволяет производить достаточно точные измерения осредненных характеристик течения в области вязкого подслоя ($y^+ < 5$) с высоким пространственным разрешением. Основным недостатком этого метода заключается в том, что использованный в работе алгоритм не позволяет получать информацию о мгновенных характеристиках потока. Томографические измерения, представленные, к примеру, в работе [5], хорошо подходят для идентификации и исследования крупномасштабных пространственных структур в пограничном слое, но имеют, в то же время, относительно невысокое пространственное разрешение и не позволяют охватить область, непосредственно прилегающую к обтекаемой поверхности.

Целью настоящей работы была адаптация методов цифровой трассерной визуализации для измерения мгновенных и осредненных полей скорости во всей области турбулентного пограничного слоя, включая буферную область и вязкий подслой, получение предварительной информации о возможности определения касательных напряжений и применение метода для исследования пограничного слоя в неканонических условиях.

ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Постановка эксперимента

Исследование турбулентного пограничного слоя методами цифровой трассерной визуализации имеет ряд отличительных особенностей. В первую очередь, пристенные течения характеризуются значительными градиентами скорости и широким диапазоном масштабов вихревых структур – от крупных, имеющих характерный размер порядка толщины пограничного слоя, до мельчайших – порядка Колмогоровского масштаба. В связи с этим выдвигаются и особые требования к измерительным системам, основанным на методах анемометрии по изображениям частиц, среди которых: большой динамический диапазон измеряемых скоростей, высокое пространственное разрешение, в особенности в направлении, перпендикулярном обтекаемой поверхности, высокая концентрация и однородное распределение трассеров в измерительной области, низкий уровень “шума” и др.

В ИТ СО РАН методы анемометрии по изображениям частиц (PIV, PTV) были адаптированы для проведения измерений в воздушном турбулентном пограничном слое. Испытания методов проводились на малой аэродинамической трубе замкнутого типа, имеющей следующие характеристики: размер рабочей части 125×125×1000 мм, скорость набегающего потока в диапазоне от 0,5 до 30 м/с, степень турбулентности $\approx 1\%$. Пограничный слой толщиной ≈ 16 мм формировался на поверхности плоской пластины, установленной горизонтально в рабочей части аэродинамической трубы.

Для регистрации трассерных картин использовалась пзс-камера с разрешением 4004×2671, снабженная длиннофокусным макрообъективом, позволяющим получать изображение с масштабным коэффициентом 1:1,6. В случае, если необходимо получить больший коэффициент увеличения или регистрировать трассерные картины на существенно

большем удалении от объекта исследований, для формирования изображения могут быть использованы специализированные микроскопы с большим рабочим расстоянием.

Поскольку пристенное течение, как правило, является существенно трехмерным, для проведения измерений в выбранном сечении толщина лазерного ножа должна быть меньше характерного размера пространственных неоднородностей потока по координате, перпендикулярной измерительной области, а также должна быть сравнима с характерным размером элементарной расчетной ячейки. В системе, использованной для проведения исследований, применялась специально разработанная оптическая насадка, формирующая лазерный нож малой толщины (≈ 200 мкм.).

При освещении измерительной области лазерным ножом в пристенной области течения возникает интенсивное диффузное отражение излучения от поверхности (блики), что значительно ухудшает соотношение сигнал/шум и может сделать изображение этой области непригодным для обработки. Для устранения бликов можно использовать несколько альтернативных подходов. Наиболее простым является покрытие поверхности светопоглощающим материалом (покраска либо анодирование), однако такой подход лишь частично снижает интенсивность бликов, не позволяя полностью избавиться от рассеянного света. Более эффективным является нанесение на поверхность флуоресцентного покрытия, переизлучающего падающий на него свет в другом диапазоне длин волн. В этом случае необходимо использовать оптические фильтры, отсекающие переизлученный свет. Существенным недостатком обоих подходов является то, что они неприменимы в случае если поверхность обладает определенными особенностями (например, имеет очень малую шероховатость, является пористой и т.д.) В наших экспериментах влияние паразитного освещения удалось снизить путем точной юстировки лазерного ножа вдоль обтекаемой поверхности (рис. 1). Такой способ освещения, применимый, очевидно, только для плоских поверхностей, обеспечивает подсветку потока вплоть до стенки ($y = 0$) при незначительном уровне отраженного света.

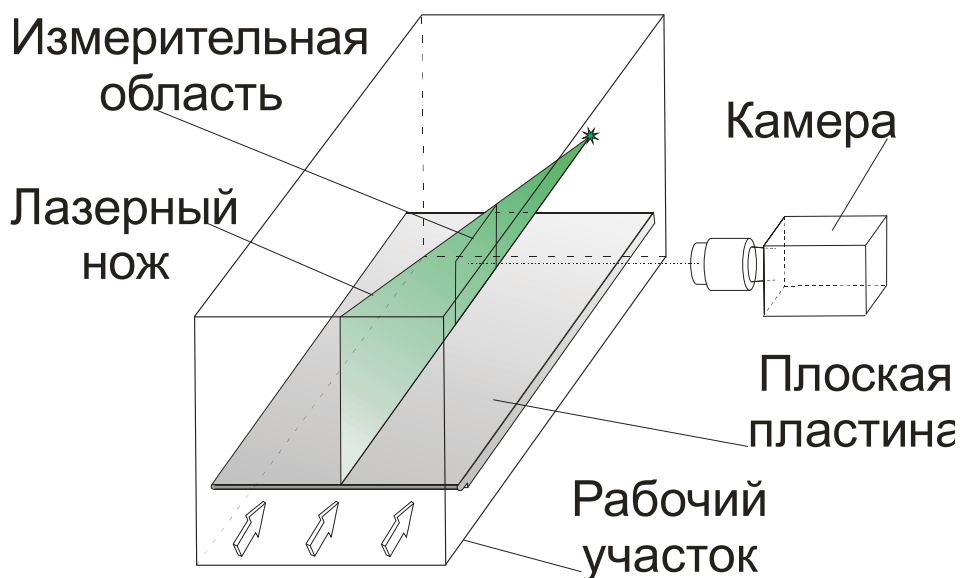


Рис.1. Схема измерений поля скорости в пограничном слое на плоской пластине

Способы обработки трассерных картин

Для определения эффективности использования различных алгоритмических подходов полученные трассерные картины обрабатывались при помощи трех независимых методов: кросс-корреляционного итерационного алгоритма с непрерывным смещением областей и учетом градиента скорости внутри расчетной области [6, 7, 8, 9], алгоритма с осреднением корреляционной функции и двухкадрового PTV (Particle Tracking Velocimetry) с оценкой вероятности исходов.

Использованный в настоящей работе итерационный кросс-корреляционный алгоритм с непрерывным смещением областей, на сегодняшний день являющийся, фактически, стандартным для планарного PIV, включал в себя процедуру компенсации смещения частиц на изображении, процедуру непрерывного смещения областей с интерполяцией распределения интенсивности в элементарной ячейке, а также процедуру расчёта первого порядка малости при разложении вектора скорости в ряд Тейлора, что позволяет учитывать градиент скорости внутри расчётной ячейки.

Другим алгоритмом обработки изображений был кросс-корреляционный алгоритм с усреднением корреляционной функции, обычно использующийся для измерения полей скорости с микронным разрешением (метод μ -PIV [10, 11]). При применении алгоритма корреляционная функция усредняется по ансамблю изображений, что позволяет повысить отношение сигнал/шум при определении максимума корреляционной функции. Существенным недостатком данного алгоритма является то, что при его использовании полностью теряется информация о мгновенных полях скорости в потоке, а результатом обработки является среднее по ансамблю измерений поле скорости.

Наконец, еще одним алгоритмом, который использовался для обработки трассерных картин, был двухкадровый PTV (Particle Tracking Velocimetry) с оценкой вероятности исходов [12]. При такой обработке на каждом из двух изображений определяются положения частиц, а затем для каждой частицы на первом кадре ведется поиск пары на втором кадре. Таким образом производится определение смещения отдельных частиц в потоке. Поскольку для этого алгоритма поле скоростей на выходе является нерегулярным, то при получении осредненных характеристик течения производится интерполяция векторов на узлы регулярной решетки (регуляризация).

Результаты обработки

В результате обработки трассерных картин описанными выше способами были получены средние и мгновенные поля скорости потока в турбулентном пограничном слое на плоской пластине. Пространственное разрешение при обработке изображений кросс-корреляционным итерационным алгоритмом составило 55×110 мкм, а при обработке кросс-корреляционным алгоритмом с усреднением корреляционной функции - 45×130 мкм. Средняя плотность векторов для метода PTV составила 250 векторов/мм², что (после процедуры регуляризации и осреднения по 500 изображениям) позволило получить поле средней скорости с разрешением 55×110 мкм.

В качестве примера на рис. 2 приведены фрагменты регулярного и нерегулярного мгновенных полей скорости, рассчитанных итерационным PIV-алгоритмом со смещением областей и методом PTV. Результаты экспериментов ограничены здесь областью течения ($y < 0,7$ мм), непосредственно прилегающей к обтекаемой поверхности. Как видно, оба метода позволяют получить значения скорости в окрестности стенки. Вместе с тем обращает на себя внимание отклонение групп векторов от направления, параллельного обтекаемой поверхности, что связано с присутствием в пограничном слое вихревых структур. В то же время поперечная составляющая скорости, связанная с вытесняющим эффектом пограничного слоя зарегистрирована не была, поскольку она имеет величину, сравнимую со скоростью нарастания толщины пограничного слоя, и не превышает, в рассматриваемом случае, $1/100$ продольной скорости потока, что составляет менее 0,1 пикс по абсолютному значению и заведомо выходит за границы динамического диапазона метода.

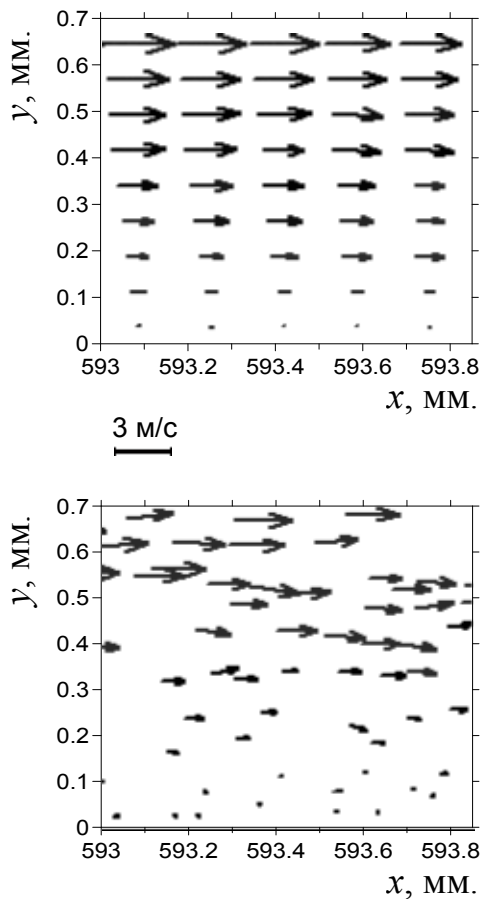


Рис. 2. Мгновенные поля скорости вблизи стенки. $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с

на участке от $y^+ = 25$ до $y^+ = 65$ (метод диаграмм Клаузера [14]). Для сравнения на рис. 4 приведены также результаты прямого численного моделирования при $Re_\theta = 670$, заимствованные из работы [15].

Видно, что измеренный профиль скорости вполне соответствует универсальному закону распределения скоростей. Анализ показывает, что максимальное отклонение экспериментальных значений U^+ от универсальной зависимости для логарифмического участка не превышает величины $\pm 2,5\%$. Отсюда ясно, что и погрешность определения касательного напряжения, которое в исследуемом случае составило $\tau_w = 0,066$ кг/м·с² ($C_f = 5,9 \times 10^{-3}$), также не превышает отмеченной величины. В целом, следует отметить, что применение итерационного кросс-корреляционного алгоритма и PTV с оценкой вероятности исходов приводят к сходным результатам. Оба алгоритма обеспечивают приемлемую точность измерений даже в непосредственной близости к стенке (вязком подслое и буферной области) и могут быть использованы для измерения скорости в пограничном слое.

Профиль средней скорости $U = f(y)$ при $Re_\theta = 520$, определенный с помощью указанных выше алгоритмов по 500 парам изображений, представлен на рис. 3. Как видно, результаты обработки итерационным алгоритмом и методом PTV различаются незначительно. В то же время обработка изображений алгоритмом с осреднением корреляционной функции приводит к заметному разбросу значений U , особенно в области, характеризующейся поперечной координатой $y = 0,15 - 0,4$ мм от стенки, т.е. вблизи максимума пульсаций продольной компоненты скорости. Последнее, как показано в работе [13], вероятно связано с возникновением на корреляционной функции двух пиков, соответствующих положительным и отрицательным пульсациям, вместо одного – соответствующего среднему значению скорости.

На рис. 4 для тех же условий эксперимента приведено распределение скорости в координатах закона стенки $U^+ = f(y^+)$, где $y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}$. Значение τ_w , из которого определялась динамическая скорость u_τ , получено из условия наилучшего совпадения измеренных значений U^+ с классическим логарифмическим законом распределения скоростей $U^+ = 5,62 \cdot \log(y^+) + 5,0$

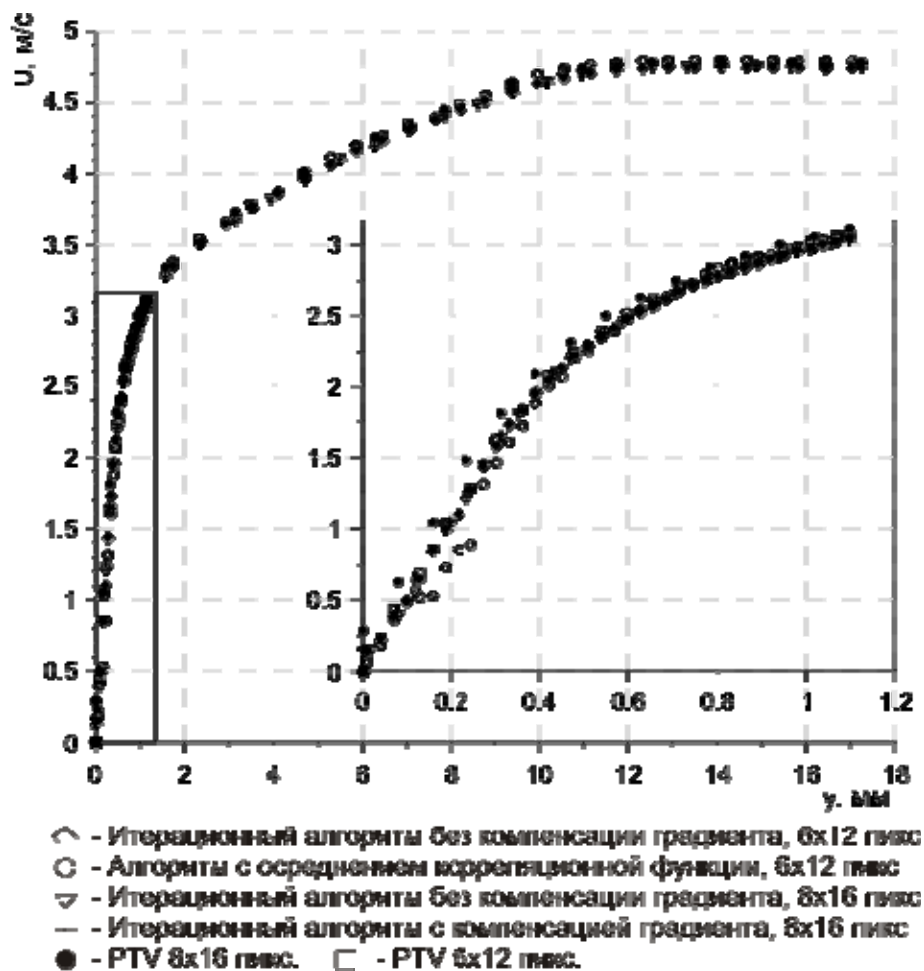


Рис. 3 Профиль средней скорости, $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с.

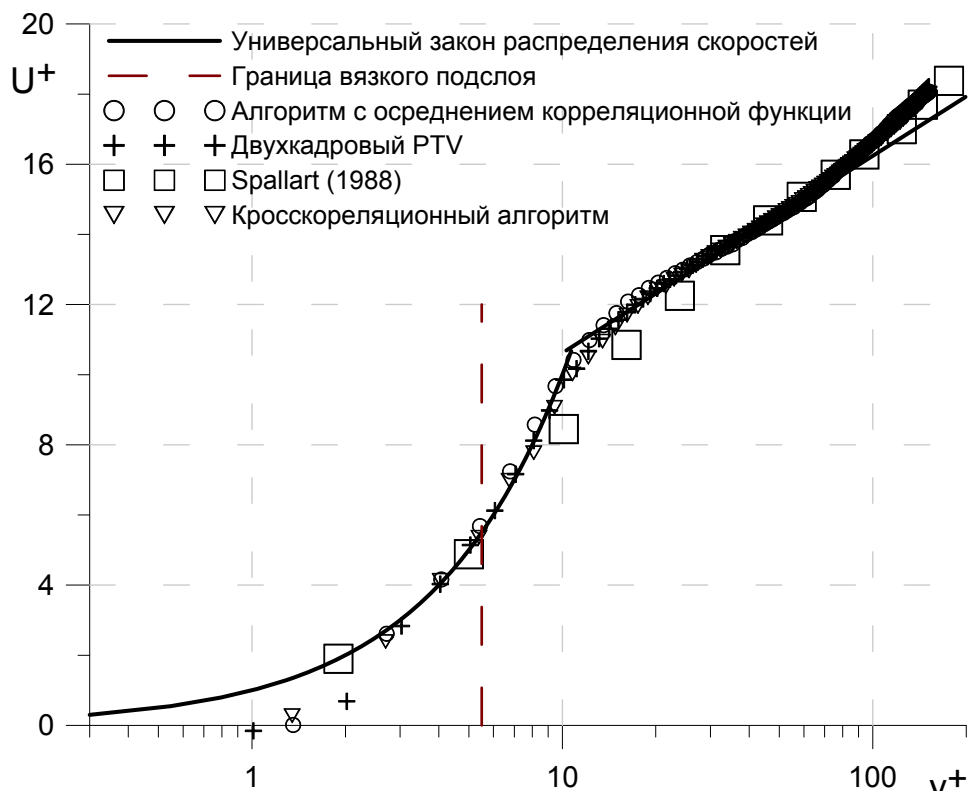


Рис. 4. Профиль средней скорости в безразмерных координатах, $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с.

ДИАГНОСТИКА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СО ВДУВОМ

Описанный выше метод применялся для анализа свойств турбулентного пограничного слоя на плоской пластине, модифицированного с помощью распределенного вдува воздуха через мелкоперфорированную проницаемую стенку. Вдув воздуха производился через образец толщиной 1,1 мм с равномерным распределением микроотверстий, пористостью $\approx 17\%$ 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 $3 \div 5\%$. Для обработки трассерных картин использовался кросскорреляционный алгоритм, поскольку при схожем с PTV качестве получаемых данных этот алгоритм имеет большее быстродействие.

Перфорированный образец размером 120×10 мм монтировался заподлицо с поверхностью пластины на расстоянии 420 мм от передней кромки. 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 через проницаемый образец осуществлялась от воздушного компрессора через систему редукторов и игольчатый натекатель, что позволяло поддерживать постоянный расход с точностью $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ кг/с/м². Объемный расход через проницаемую поверхность определялся при помощи установленного сразу после натекателя расходомера TSI 4140.

В экспериментах удалось получить значения скорости во всей области пограничного слоя, однако при значениях объемного расхода вдуваемого воздуха Q , больших 1,3 л/мин (что соответствует массовому расходу $0,022$ кг/с/м²), форма профиля вблизи стенки претерпевала искажения и становилась отличной от линейной, что, вероятнее всего, связано с ухудшением качества трассерных картин вследствие оттеснения частиц от поверхности пластины в результате эффекта вдува. В качестве примера таких измерений на рис. 5 приведены профили средней скорости, ограниченные начальными значениями координаты y , в зависимости от величины массового расхода вдуваемого воздуха Q . Как видно, с ростом Q проявляется тенденция к устойчивому уменьшению градиента скорости $\partial U / \partial y$, и, следовательно, снижению величины поверхностного трения, а само распределение скорости носит линейный характер при значениях $Q < 1,3$ л/мин. Таким образом, при расходе воздуха от 0 до 1,3 л/мин использовавшийся метод позволил 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 было замечено увеличение протяженности линейного участка скорости с ростом Q , что хорошо согласуется с опубликованными в литературе данными, в частности с результатами численного анализа, приведенными в работе [16].

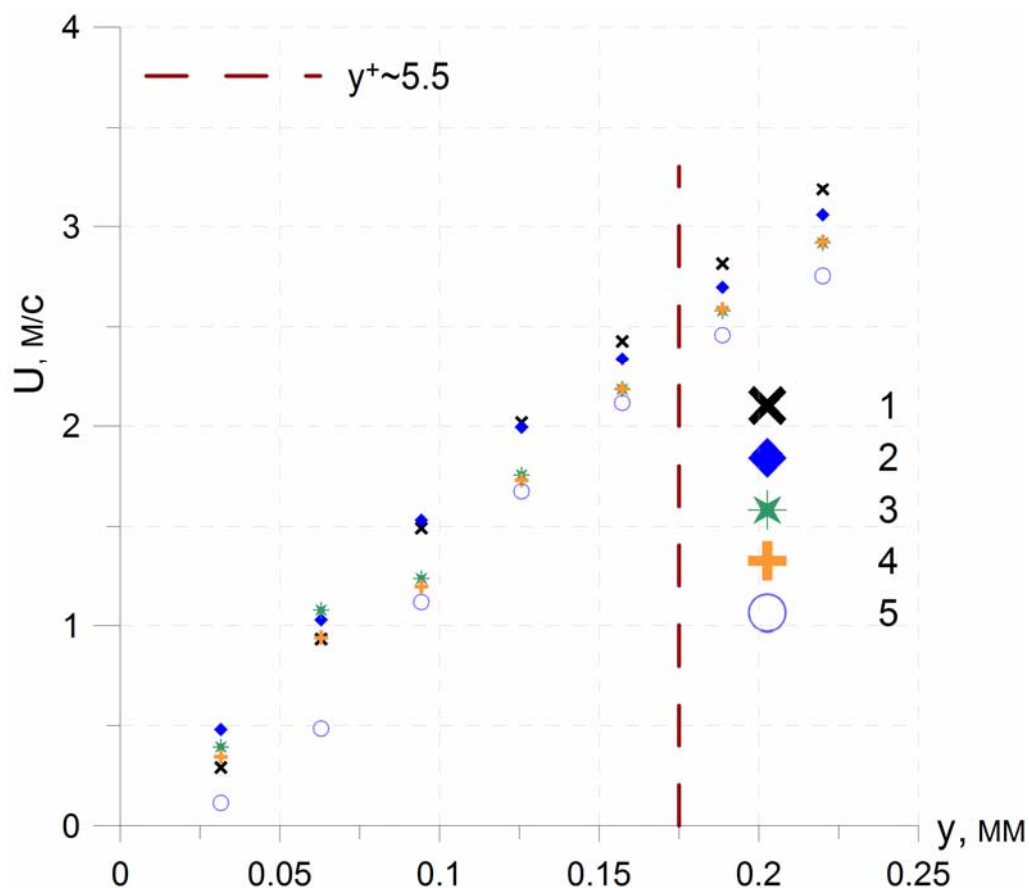


Рис. 5. Профили средней скорости, ограниченные начальной координатой y , при различных значениях расхода вдуваемого воздуха Q [кг/с/м²]: 1 – 0; 2 – 8×10^{-3} ; 3 – $1,5 \times 10^{-2}$; 4 – $2,2 \times 10^{-2}$; 5 – $5,9 \times 10^{-2}$.

Полученные данные позволили проанализировать эффект снижения поверхностного трения за счет вдува воздуха (рис. 6). Для сравнения здесь показаны также результаты термоанемометрических измерений, выполненных на аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, заимствованные из работ [17, 18]. Нетрудно заметить, что, как и термоанемометрические, результаты измерений методом PIV указывают на устойчивый характер снижения коэффициента поверхностного трения C_f . Следует также отметить, что хотя качественно снижение трения с ростом расхода имеет схожий характер, в количественных данных имеются отличия, которые могут быть, вероятно, связаны 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.

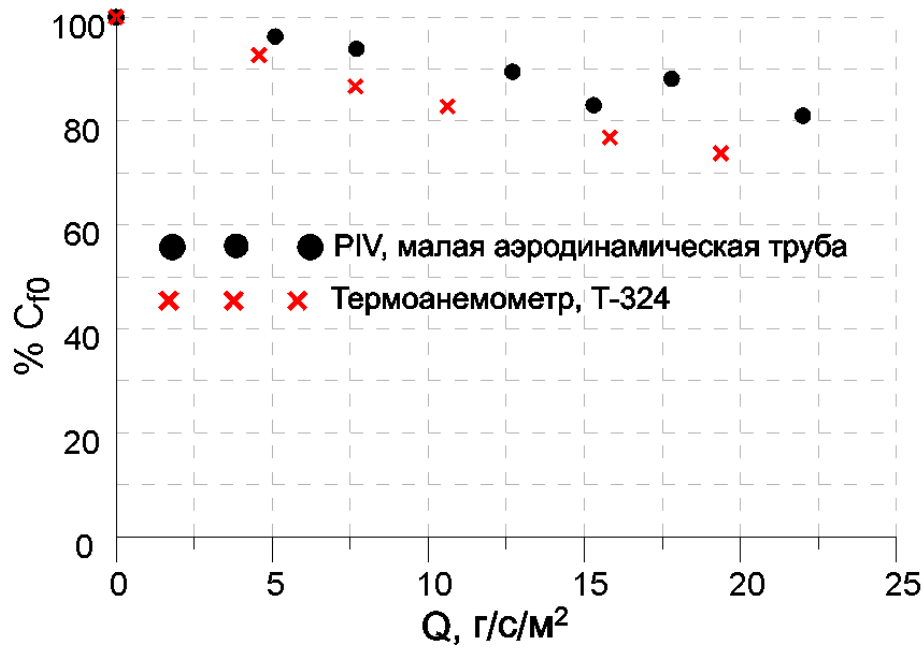


Рис. 6. Изменение коэффициента поверхностного трения в зависимости от массового расхода воздуха, $U_\infty = 11$ м/с, $Re_x = 4,04 \cdot 10^5$

Что касается распределения скорости по всей толщине пограничного слоя, то в ходе измерений влияние вдува было зарегистрировано не только в вязком подслое, но и распространялось также в буферную зону и логарифмическую область пограничного слоя. На рис. 4 представлены профили скорости в переменных внешней области (а) и координатах закона стенки (б), измеренные при различных значениях расхода воздуха. Видно, что в координатах закона стенки изменяется угол наклона профиля скорости, что делает метод Клаузера, обычно используемый для определения C_f по профилям скорости в логарифмической области, явно неприменимым. В этом случае локальный коэффициент поверхностного трения может быть определен только по линейной части профиля на основе достаточно точных измерений скорости в пристенной области течения.

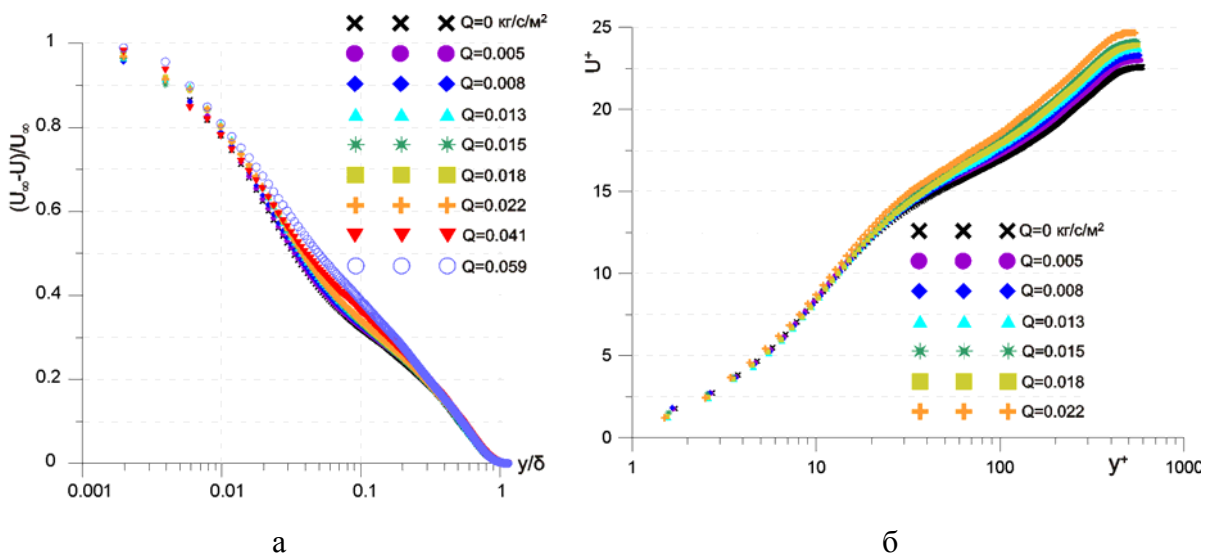


Рис. 7. Изменение профиля средней скорости с расходом воздуха. $U_\infty = 11$ м/с, $Re_x = 4,04 \cdot 10^5$.

В дополнение к описанным выше измерениям была проведена высокоскоростная трассерная визуализация турбулентного пограничного слоя в условиях вдува воздуха через пористый образец. В этих экспериментах положение камеры и лазера было изменено: плоскость лазерного ножа располагалась параллельно поверхности пластины, а расстояние от поверхности до плоскости ножа регулировалось путем перемещения излучателя лазера, установленного на высокоточном автоматизированном координатном механизме. Частота съемки в эксперименте составляла 28 кГц.

С ростом расхода воздуха в измерительной области начинали возникать протяженные области, не заполненные частицами (см. рис. 8). Вероятно, что такие участки формируются в ходе взаимодействия основного потока, засеянного трассерами, с вдуваемым воздухом, в который трассеры не добавлялись, в пользу чего свидетельствует отсутствие подобных незасеянных областей в пограничном слое без вдува. Интерес при этом вызывает их структура, схожая по своему виду со структурой протяженных вихрей, присутствующих в немодифицированном пограничном слое (рис. 9). Описанная особенность позволяет предположить, что перенос вдуваемого воздуха от стенки осуществляется за счет крупномасштабных вихревых структур и носит неоднородный характер. Указанное предположение, конечно, нуждается в дополнительной проверке и более тщательном изучении.

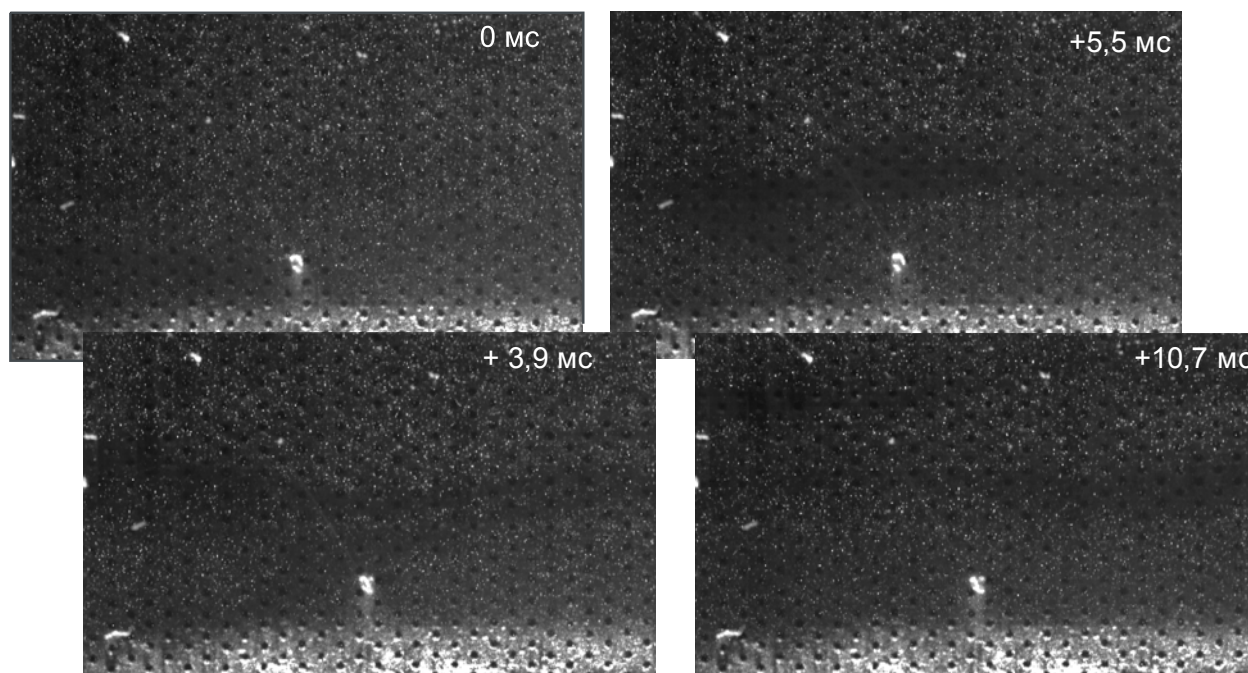


Рис. 8. Последовательность трассерных картин при расходе вдуваемого воздуха $Q=0.013$ кг/с/м². Расстояние от лазерного ножа до поверхности пластины 0.8 мм.

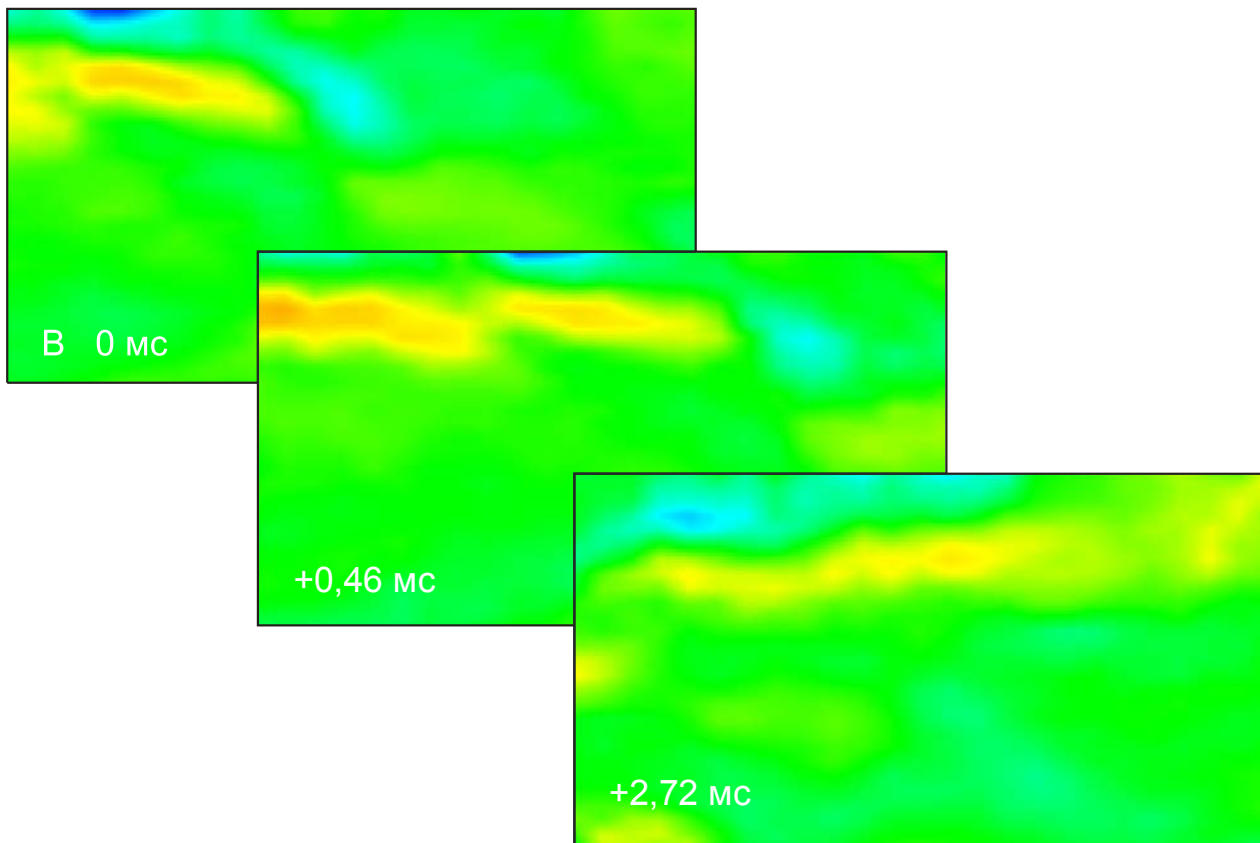


Рис. 9. Последовательность полей завихренности над пористой поверхностью в отсутствие вдува. Расстояние от лазерного ножа до поверхности пластины 0.8 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены подходы и особенности измерений, дан сравнительный анализ алгоритмов обработки трассерных картин полей скорости и приведены результаты измерений полей скорости и турбулентных пульсаций скорости в несжимаемом турбулентном пограничном слое плоской пластины методами цифровой трассерной визуализации.

В работе представлена методика, позволяющая измерять поля скорости в воздушном пограничном слое по смещению изображений частиц и приведено сравнение трех различных способов обработки трассерных картин, полученных в эксперименте. В ходе сравнения было показано, что при выборе расчетной области одинаковых размеров (в случае PTV – области, по которой производится осреднение при регуляризации) использование кросс-корреляционного итерационного алгоритма и PTV приводит к сходным результатам и обеспечивает приемлемую точность измерений скорости даже в вязком подслое. Использование алгоритма с осреднением корреляционной функции дает возможность получать среднее поле скорости при наличии пульсаций небольшой интенсивности, однако в пристенной области, где отношение u/U велико, приводит к большему, чем для кросс-корреляционного алгоритма и метода PTV, разбросу значений скорости. Полученные профили средней скорости позволяют с достаточной точностью определять локальные значения касательного напряжения τ_w , используя для этого как логарифмическую область пограничного слоя так и линейный участок вблизи стенки.

С использованием указанной методики проведено исследование свойств турбулентного пограничного слоя на плоской пластине, модифицированной с помощью распределенного вдува воздуха через мелкоперфорированную проницаемую стенку. Исследование позволило определить наличие устойчивого эффекта снижения коэффициента поверхностного трения C_f при увеличении расхода а также выявить ряд изменений профиля средней скорости потока и

пульсационных характеристик течения под воздействием вдува. Кроме того, скоростная трассерная визуализация позволила зарегистрировать процесс перемешивания и сделать предварительные выводы о взаимодействии вдуваемого воздуха с основным потоком.

За рамками данного исследования остались вопросы измерения спектра турбулентности и его изменения под воздействием вдува. Вопрос о взаимодействии вдуваемого воздуха с присутствующими в потоке структурами также требует более тщательного изучения. Эти и другие вопросы станут предметом дальнейших работ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Настоящая работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1355.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. **Lin Jie, Foucaut Jean-Marc, Laval Jean-Philippe, Perenne Nicolas, Stanislas Michel.** Assessment of different SPIV processing methods for an application to near-wall turbulence // Topics in Applied Physics. 2008. Vol. 112. P. 191–221.
2. **Herpin S., Wong C.Y., Laval J.-Ph., Stanislas M., Soria J.** Comparison of high spatial resolution stereo-PIV measurements in a turbulent boundary layer with available DNS dataset // 16th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2007. Gold Coast, Queensland, Australia.
3. **Foucaut J.M, Milliat B., Perenne N., Stanislas M.** Characterization of different PIV algorithms using the EUROPIV Synthetic Image Generator and real images from a turbulent boundary layer // Proc. EUROPIV 2 Workshop on Particle Image Velocimetry, 2004. Springer, Berlin. P. 163–86.
4. **Kähler C.J., McKenna R., Scholz U.** Wall-shear-stress measurements at moderate Re-numbers with single pixel resolution using long distance -PIV – an accuracy assessment // Papers of 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry. 2005. USA, Pasadena, California.
5. **Schroder A., Geisler R., Staack K., Elsinga G. E., Scarano F., Wieneke B., Henning A., Poelma C., Westerweel J.** Eulerian and Lagrangian views of a turbulent boundary layer flow using time-resolved tomographic PIV. // Experiments in Fluids. 2011. Vol. 50. P. 1071–1091.
6. **Tokarev M.P., Markovich D.M., Bilsky A.V.** Adaptive algorithms for PIV image processing // Comput. Technol. 2007. Vol. 12, No. 3. P. 109–131.
7. **Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A practical guide, Second Edition, 2007. Berlin. Springer.
8. **Scarano F., Riethmuller M.L.** Advances in iterative multigrid PIV image processing // Experiments in Fluids. 2000, Vol. 29, Suppl. 1, P. 51–60.
9. **Scarano F.** Iterative image deformation methods in PIV // Review Article Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 13. P. R1–R19.
10. **Meinhart C.D., Wereley S. T.** A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields // Journal of Fluids Engineering. 2000. Vol. 122 (2). P. 285–289.
11. **Meinhart CD, Wereley ST, Santiago JG.** Micron resolution velocimetry techniques // Selected papers from the 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techn. to Fluid Mech, 2000. Springer. Berlin, Germany.
12. **Baek S.J., Lee S.J.** A new two-frame particle tracking algorithm using match probability // Experiments in Fluids. 1996. Vol. 22. P. 23–32.
13. **Poelma C., Westerweel J.** Generalized displacement estimation for averages of non-stationary flows // Experiments in Fluids. 2010 (in print, available online).

URL: www.springerlink.com/content/58u0382521066607

14. **Clauser F.H.** Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // J. Aero. Sci. 1954. Vol. 21. P. 91–108.
15. **Spalart P.R.** Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $Re_\theta = 1410$ // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 187. P. 61–98.
16. **Ерошенко В.М., Зайчик Л.И., Климов А.А., Кондратьев В.И., Першуков В.А.** Влияние вдува и отсоса на характеристики вязкого подслоя в турбулентном потоке // Инженерно-физический журнал, 1983, Т. 45, N 2, с. 204-209.
17. **Kornilov V.I., Boiko A.V.** Efficiency of air microblowing through microperforated wall for flat plate drag reduction // AIAA J., 2012, Vol. 50, № 3, pp.724-732.
18. **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.

A.V. Bilsky¹, O.A. Gobyzov¹

¹*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, , Russia, 630090,
Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1. E-mail: oleg.a.g.post@gmail.com*

TURBULENT BOUNDARY LAYER DIAGNOSTICS BY MEANS OF PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AND PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY

In the present paper, we discuss various techniques for measuring velocity fields in incompressible turbulent boundary layer by means of PIV and particle tracking. In particular, key features for performing measurements in the vicinity of streamlined surface are considered. A description of the optical measuring system and method of flow seeding with tracer particles is presented. Results of measurements for flow velocity fields in boundary layer on a flat plate are analyzed in the paper. Comparative data illustrating the efficiency of various algorithms for particle images interrogation is presented. Some of the results on application of the above-mentioned techniques for diagnostics of the boundary layer, modified by air injection through microperforated surface, are also presented in the paper.

PIV, PTV, TURBULENT BOUNDARY LAYER, FLAT PLATE, AIR BLOWING, BOUNDARY LAYER CONTROL, DRAG