

УДК 532.574.7 + 532.526.4 + 532.526.72

Применение методов цифровой трассерной визуализации для диагностики турбулентного пограничного слоя*

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

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный университет*

E-mail: dmark@itp.nsc.ru

В статье излагаются подходы для измерения полей скорости и пульсаций скорости в несжимаемом турбулентном пограничном слое методами цифровой трассерной визуализации. Рассмотрены особенности выполнения измерений в области течения, формирующегося вблизи обтекаемой поверхности. Приведено описание оптической схемы измерений и способов засева потока трассерами. Анализируются результаты измерения полей скорости и турбулентных пульсаций скорости в пограничном слое на непроницаемой плоской пластине. Представлены сравнительные данные, характеризующие эффективность применения различных алгоритмов обработки трассерных картин.

Ключевые слова: оптические методы, PIV, PTV, трассерная визуализация, поле скорости, пульсации, турбулентный пограничный слой, плоская пластина.

Введение

С начала двадцатого века, после того как теория пограничного слоя была выделена в самостоятельный раздел механики жидкости, непрерывно ведутся теоретические и экспериментальные исследования в этой области. Важность изучения свойств пристенного течения для практических приложений, в частности, для решения задач, связанных с управлением турбулентным пограничным слоем с целью снижения сопротивления трения летательных аппаратов и других движущихся объектов, продолжает оставаться одной из актуальных проблем современной прикладной гидроаэродинамики. К настоящему времени большинство статистических характеристик, по крайней мере, в равновесном (по Клаузеру) турбулентном пограничном слое, хорошо изучены, а некоторые из них, такие как профили средней скорости, температуры и концентрации примесей, могут быть определены в рамках известных полуэмпирических соотношений. В то же время

* Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 103 по теме: «Разработка способов управления пристенным турбулентным течением для снижения сопротивления обтекаемой поверхности»).

исследование течения, например в буферной области пограничного слоя ($5 < y^+ < 30$), до сих пор возможно только экспериментальными методами или при помощи прямого численного моделирования по причине его сложности и большого числа факторов, оказывающих влияние на поток [1]. С другой стороны, известно, что основные процессы, связанные с турбулентным обменом между слоями жидкости, происходят в области течения, непосредственно прилегающей к обтекаемой поверхности. По этой причине большое значение придается изучению формирующихся в пограничном слое когерентных структур, исследование которых требует максимально полной информации о пространственной и временной структуре турбулентности. В этой связи в последнее десятилетие самое пристальное внимание уделяется развитию полевых оптических методов диагностики потоков, основанных на слежении за трассерами (Particle Image Velocimetry), с использованием которых проводится все большее количество экспериментальных исследований турбулентных течений. Не случайно ряд опубликованных в литературе работ посвящен разработке, применению и совершенствованию оптических методов измерения полей скорости в качестве эффективного инструмента для диагностики пограничных слоев. В частности, в работе [2] анализируется способ измерения полей средней скорости с использованием микроскопа с большим рабочим расстоянием и алгоритм обработки изображений с расчетом осредненных двухточечных корреляций. Кроме того, в указанной работе рассмотрены характерные для оптических методов измерения полей скорости источники погрешности. Предложенный авторами способ позволяет производить достаточно точные измерения осредненных характеристик течения в области вязкого подслоя ($y^+ < 5$) с высоким пространственным разрешением. Однако особенности оптики значительно ограничивали размеры измерительной области, а использованный ими алгоритм не позволял получить информацию о мгновенных характеристиках потока. В другой работе [3] представлен ряд алгоритмических подходов для обработки трассерных изображений и приведены результаты контрольных измерений полей скорости в пограничном слое на плоской пластине методом цифровой трассерной визуализации в стереоконфигурации (Stereo-PIV). Исследования выполнялись в искусственно генерируемом турбулентном пограничном слое, поэтому его толщина (0,3 м) была существенно больше характерной для пограничного слоя в практических приложениях.

В работах [4, 5] проводятся сравнения результатов измерений трехкомпонентных полей скорости в безградиентном турбулентном пограничном слое методом Stereo-PIV с результатами прямого численного моделирования и термоанемометрических измерений. В обеих работах продемонстрировано хорошее совпадение результатов измерения полей средней скорости PIV методом с термоанемометрическими данными и результатами прямого численного моделирования. 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 100 % и более. В работе [6] показано, что с уменьшением размера элементарной расчетной ячейки расхождение экспериментальных и расчетных кривых происходит при меньших значениях y^+ .

Несмотря на довольно успешные примеры применения полевых методов для измерения полей скорости в пограничном слое, существует ряд сложностей, связанных с такими измерениями. Получение детальной информации о характеристиках потока в пристенной области требует высокого пространственного разрешения метода по нормальной к стенке координате. Для этого необходимо организовать высокую концентрацию трассеров и использовать оптику, позволяющую регистри-

ровать области, имеющие размеры порядка толщины пограничного слоя, причем на значительном расстоянии, часто определяемом размерами рабочей части аэродинамической трубы. Кроме того, приходится решать проблему диффузных отражений лазерного излучения от поверхности модели, которые приводят к засветке матрицы регистрирующего устройства. Выбор и способы оптимизации алгоритмов обработки изображений также оказывают значительное влияние на конечный результат измерений, его погрешность и пространственное разрешение.

Наконец, нельзя не отметить чрезвычайную важность совершенствования бесконтактных методов зондирования сдвиговых турбулентных потоков, в том числе и методов трассерной визуализации, с целью создания более совершенного инструментария для измерения касательного напряжения на стенке τ_w . Эта проблема стоит особенно остро при исследованиях неканонического турбулентного пограничного слоя, например, формирующегося вдоль пористой или перфорированной стенки, где выбор приемлемой методики для определения τ_w чрезвычайно ограничен. Это тем более важно, что пористая стенка нередко используется для организации процесса управления пограничным слоем при помощи вдува или отсоса газа, что требует точной информации о сопротивлении трения при обтекании такой поверхности.

Целью настоящей работы являлась адаптация методов цифровой трассерной визуализации для измерения мгновенных и осредненных полей скорости во всей области турбулентного пограничного слоя, включая буферную область и вязкий подслой, и получение предварительной информации о возможности определения касательного напряжения на стенке при обтекании непроницаемой плоской поверхности.

1. Техника и методика экспериментов

1.1. Обоснование метода измерений

Принцип измерения мгновенного поля скорости потока в заданной плоскости методами PIV известен, он основан на определении смещения частиц примеси, находящихся в этой плоскости, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры) и дважды освещаются импульсным лазером. Образы частиц регистрируются на скоростную цифровую камеру. Последующая обработка изображений дает возможность рассчитать смещение частиц за время между вспышками источника света и в конечном итоге построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры.

Что касается аэродинамических испытаний, то засев воздушного потока имеет ряд дополнительных особенностей. В частности, трассеры, используемые для визуализации пограничного слоя, должны иметь малый размер (порядка 1 мкм), сферическую форму и по возможности обладать гладкой поверхностью. Они должны быть электронейтральными, иметь плотность, близкую к плотности воздуха, и не должны агломерировать или испаряться. Засев, основанный на распылении масел соплом Ласкина, испарении глицериновых смесей и других жидкостей, приводит к их осаждению на стенках канала. Поскольку по окончании эксперимента, как правило, требуется полное удаление трассеров из воздушного канала, все это резко ограничивает выбор самих трассеров. Очевидно, что одновременно удовлетворить всем указанным требованиям обычно невозможно, и поэтому материал для засева выбирается в зависимости от условий эксперимента. Не случайно

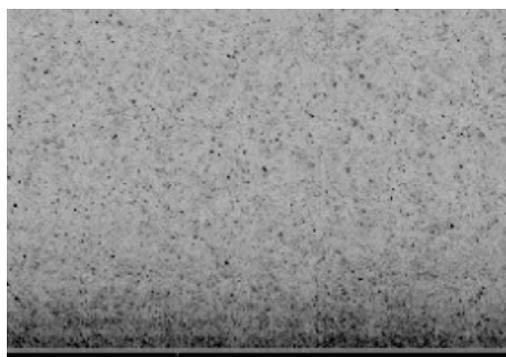
особенностям засева (в частности, при помощи генераторов тумана) уделяется повышенное внимание (см., например, [7]). В случае, если полное удаление трассеров из канала по окончании эксперимента является критичным, используется засев при помощи частиц CO_2 , преимущества и недостатки которого рассматриваются в работе [8].

В нашей работе использовался засев табачным дымом и трассерами на основе глицериновой смеси, получаемыми при помощи коммерческого генератора тумана. Оба способа достаточно просты, позволяют достигать необходимой концентрации трассеров, имеющих размеры 1–5 мкм и позволяющих легко получать идентифицируемые образы частиц.

Регистрация образов частиц в потоке в современных методах трассерной визуализации обычно производится при помощи CCD или CMOS-камер, объектив которых подбирается исходя из условий эксперимента. Наиболее точных результатов при проведении измерений в пограничном слое позволяет добиться использование микроскопа с большим рабочим расстоянием [2]. Главным недостатком применения такой оптической схемы остается чрезвычайно малый размер измерительной области, не позволяющий охватить всю область пограничного слоя от стенки до ядра потока. Недорогим альтернативным вариантом могут служить длиннофокусные макрообъективы.

В методах трассерной визуализации для подсветки трассеров в измерительной области используется лазерный нож, формирующийся из лазерного луча при помощи системы сферических и цилиндрических линз. Для того чтобы при смещении частицы, находящиеся вне фокуса системы регистрации, не создавали шума на изображениях, необходимо, чтобы толщина лазерного ножа была меньше глубины резкости регистрирующей аппаратуры. Кроме того, в случае измерения двухкомпонентных полей скорости она должна быть сравнима с размерами элементарной ячейки, в которой происходит расчет вектора скорости. В нашем случае для создания ножа использовался импульсный Nd:YAG лазер, который был снабжен специально разработанной оптической насадкой для формирования светового ножа малой толщины (250 мкм).

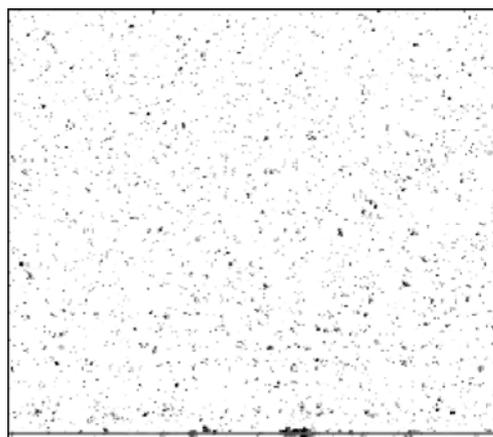
При освещении измерительной области лазерным ножом в пристенной области течения возникает интенсивное диффузное отражение излучения от поверхности (блики), что значительно ухудшает соотношение сигнал/шум и может сделать изображение этой области непригодным для обработки. Для устранения указанной проблемы можно использовать несколько альтернативных подходов. Наиболее простым является покрытие поверхности светопоглощающим материалом (покраска либо анодирование). Такой подход, однако, не позволяет полностью избавиться от диффузного света (рис. 1). К тому же он не применим в случае, если поверхность является пористой, либо обладает определенными особенностями (например, имеет очень малую шероховатость). Еще одним возможным способом



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.

Рис. 1. Изображение трассеров в случае использования светопоглощающего покрытия.

Рис. 2. Изображение трассеров в случае юстировки лазерного ножа вдоль поверхности (граница поверхности отмечена линией).



В наших экспериментах влияние паразитного освещения удалось снизить путем точной юстировки лазерного ножа вдоль обтекаемой поверхности. Излучение лазера при этом направлено под малым углом к поверхности, что обеспечивает подсветку потока вплоть до стенки ($y = 0$) при незначительном уровне отраженного света. Это позволяет практически полностью избавиться от диффузных отражений (рис. 2) и при этом не требует нанесения каких-либо покрытий на поверхность, что не всегда допустимо по условиям эксперимента. Правда, такой подход неприменим при обтекании криволинейной поверхности.

1.2. Экспериментальная установка

Для исследования возможностей методов цифровой трассерной визуализации и их адаптации для измерений в турбулентном пограничном слое был создан специальный экспериментальный стенд (рис. 3). Он представляет собой комбинацию малой аэродинамической трубы замкнутого типа с размерами рабочей части $125 \times 125 \times 1000$ мм и оптического измерительного комплекса «ПОЛИС».

Скорость набегающего потока в аэродинамической трубе может меняться в пределах от 0,5 до 30 м/с, что соответствует числам Рейнольдса на 1м от $3,25 \cdot 10^4$ до $1,95 \cdot 10^6$. При этом степень турбулентности набегающего потока по нашим оценкам не превышает величину порядка 2 %.

Измерительный комплекс «ПОЛИС» включает в себя двойной импульсный Nd:YAG лазер, снабженный оптической насадкой для создания светового ножа и характеризующийся следующими параметрами: длина волны лазерного излучения 532 нм, энергия в импульсе 50 мДж, длительность импульса 5 нс, диаметр пучка 5 мм, расходимость ≤ 4 мрад. Для регистрации трассерных картин использовалась 4-х мегапиксельная CCD-камера «Видеоскан», имеющая разрешение 2048×2048 пикселей и снабженная длиннофокусным макрообъективом SIGMA APO MACRO f180/3,5 с набором удлинительных колец, позволяющих изменять фокусное расстояние системы и добиваться оптимального размера регистрируемой области. Для синхронизации работы оборудования использовался генератор импульсов, программируемый через интерфейс RS-232. Управление измерительным комплексом и обработка полученных изображений производились с помощью программного пакета Actual Flow [9].

Измерения выполнялись на модели непроницаемой плоской пластины из сплава Д16Т размерами 750×124 мм²

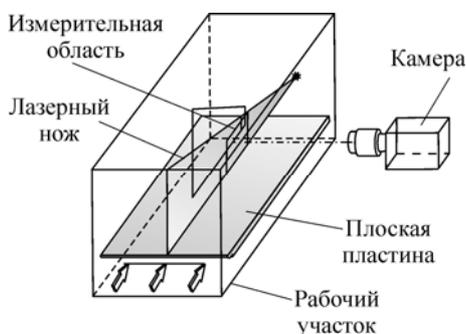


Рис. 3. Схема измерений.

в плане и толщиной 6 мм, установленной горизонтально в рабочей части трубы на боковых направляющих рельсах. Носик пластины был выполнен в форме полуцилиндра радиусом 1,2 мм. Указанная геометрия передней кромки обеспечивала в условиях повышенной фоновой турбулентности возможность формирования вдоль пластины безградиентного турбулентного пограничного слоя, толщина которого в измерительном сечении составляла около 13 мм.

Процедура измерений выполнялась в следующей последовательности: аэродинамический контур трубы засеивался трассерами с помощью генератора аэрозоля Magnum 1800 (средний размер частиц порядка 1 мкм). После достижения концентрации частиц в измерительной области порядка 0,08–0,13 частиц/пикс, достаточной для корректной работы использовавшихся алгоритмов, генератор аэрозоля выключался и запускалась измерительная система.

1.3. Алгоритмы обработки трассерных картин

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

При использовании кросскорреляционного итерационного алгоритма с непрерывным смещением областей [10, 11] вся измерительная область разбивается на элементарные ячейки (расчетные области размером $m \times n$). Размер ячеек и концентрация трассеров в эксперименте подбираются таким образом, чтобы в каждую расчетную область попало несколько частиц. После этого производится расчет кросскорреляционной функции и поиск максимального корреляционного пика, отвечающего наиболее вероятному смещению частиц в элементарной области. Условная схема этого процесса изображена на рис. 4. Поскольку изображение является дискретным, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях. Для того чтобы определить смещение частиц с подпиксельной точностью, используют интерполяцию корреляционного максимума кривой Гаусса. По определенному, наиболее вероятному смещению частиц d и известному интервалу времени между импульсами лазера Δt рассчитывается наиболее вероятная скорость частиц внутри расчетной области: $u = Md / \Delta t$, где M — масштабный коэффициент увеличения системы регистрации.

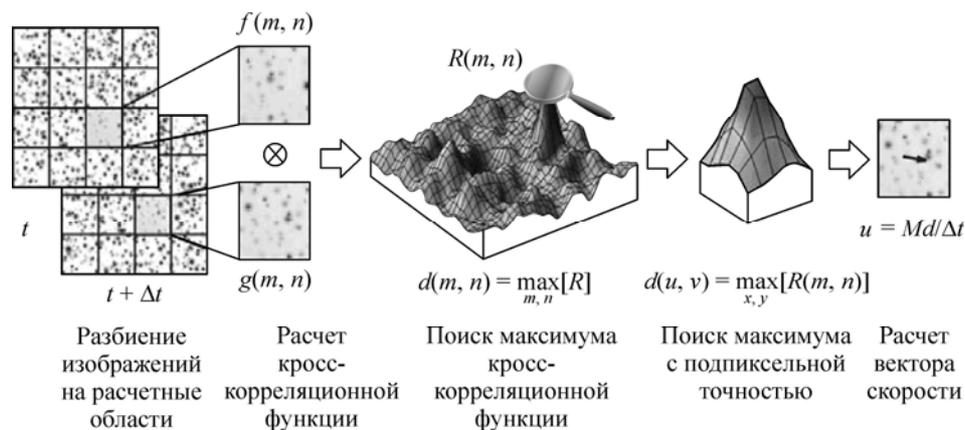


Рис. 4. Кросскорреляционный алгоритм вычисления вектора скорости по изображениям частиц в потоке.

Использованный в настоящей работе алгоритм является итерационным. На каждой итерации метода оценивается уточняющая поправка u_c^k к полю скорости u^k . Таким образом, с использованием текущего приближения $u^k = u^{k-1} + u_c^k$, $k \in \mathbb{N}$ компенсируется смещение трассеров на исходных изображениях и вычисляется остаточное смещение, уточняющее текущую аппроксимацию. Важным элементом итерационного алгоритма является компенсация смещения частиц на изображении, которая достигается выбором смещенных друг относительно друга расчетных областей на первом и втором кадрах. В общем случае скорость в любой точке $u(x, y)$ внутри расчетной области можно разложить в ряд Тейлора. При этом поправка нулевого порядка будет соответствовать одновременному смещению всех элементов области на один и тот же вектор. При использовании дробного значения вектора смещения применяется процедура непрерывного смещения областей [12], при которой происходит интерполяция распределения интенсивности в элементарной ячейке. Следующий — первый порядок малости — позволяет учитывать градиент скорости в потоке и соответствует алгоритму CWD (Iterative Algorithm with Continuous Window Shifting and Deformation) [13]. Первый и второй порядки малости требуют оценки соответственно первой и второй производной скорости в центре расчетной области.

Другим алгоритмом обработки изображений был кросскорреляционный алгоритм с усреднением корреляционной функции, обычно использующийся для измерения полей скорости с микронным разрешением (метод μ -PIV [14, 15]). При применении алгоритма корреляционная функция усредняется по ансамблю изображений, что позволяет повысить отношение сигнал/шум при определении максимума корреляционной функции. При этом количество трассеров на изображении может быть значительно ниже, чем для случая обработки двухкадровых изображений (CWD). Это позволяет получать векторные поля с большим разрешением, чем в кросскорреляционном итерационном алгоритме, не повышая при этом плотность засева потока. 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 [16]. При такой обработке сначала 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. Далее по рассчитанному смещению частиц и интервалу времени между импульсами лазера строится векторное поле скоростей. Так как в этом алгоритме каждой найденной частице ставится в соответствие вектор скорости, то поле скоростей на выходе является нерегулярным, то есть вектор скорости присваивается средней точке между начальным и конечным положением каждого найденного трассера, а не узлам регулярной решетки. Для того чтобы определять положение отдельных частиц, их концентрация на изображении должна быть в несколько раз меньше, чем это необходимо для использования итерационного PIV. При получении осредненных характеристик течения производится интерполяция векторов на узлы регулярной решетки (регуляризация).

Что касается погрешности описанных алгоритмов, то ее определение непосредственно в эксперименте затруднено ввиду того, что каждая реализация мгновенного поля скорости является уникальной, и, таким образом, статистический

анализ погрешности измерений оказывается невозможным. Чтобы указать возможные пределы случайной и систематической ошибки измерений, алгоритмы обработки тестируют на наборах синтетических изображений. Подробный анализ источников погрешности измерений методами трассерной визуализации можно найти в работах [10, 11, 15, 16]. Поэтому здесь мы лишь кратко изложим особенности, влияющие на погрешность измерений в пограничном слое.

В случае проведения измерений в пристенной области течения основными источниками погрешности являются: неоднородность распределения частиц в измерительной области, связанная с вытесняющим действием пограничного слоя, отражение лучей от поверхности пластины и наличие в измерительной области сильного градиента скорости. В проводившихся экспериментах концентрация частиц в измерительной области действительно снижалась в непосредственной близости от стенки, оставаясь при этом в пределах значений (не ниже 0,08 частиц/пикс) необходимых для корректной работы кросскорреляционного алгоритма.

Погрешность, связанная со снижением соотношения сигнал/шум в результате отражения лазерного ножа от поверхности пластины, была устранена путем юстировки лазерного ножа вдоль поверхности. Таким образом, наибольшую погрешность в результаты обработки корреляционными алгоритмами вносило наличие градиента скорости $\frac{\partial u_x}{\partial y}$, составлявшего около 0,07 пикс/пикс. Согласно данным, представленным в [11], случайная ошибка, связанная с таким значением градиента скорости в потоке, составляет примерно 0,1 пикс. При этом, как показано в работе [17], для градиента скорости, превышающего 0,025 пикс/пикс, определяющую роль в погрешности играет случайная ошибка, а выбор типа интерполяции корреляционного максимума практически не влияет на ее уровень. В то же время, для PTV с оценкой вероятности исходов наличие градиента скорости не сказывается на точности определения смещения частиц. Однако случайная погрешность, в основном связанная с эффектом группировки рассчитываемых величин в области целочисленных значений (peak-locking), составляет также около 0,1 пикс [18].

2. Результаты экспериментов

Рассмотрим эффективность использования отмеченных выше алгоритмических подходов для получения требуемой информации о характеристиках исследуемого потока. В результате обработки трассерных картин получены средние и мгновенные поля скорости течения в турбулентном пограничном слое на плоской пластине. При этом пространственное разрешение при обработке изображений кросскорреляционным итерационным алгоритмом было 85×170 мкм, а в кросскорреляционном алгоритме с усреднением корреляционной функции составило 45×180 мкм. В результате обработки изображений методом PTV средняя плотность векторов составила 250 векторов/мм², что (после процедуры регуляризации и осреднения по 500 изображениям) позволило получить поле средней скорости с разрешением 45×180 мкм.

В качестве примера на рис. 5 приведены фрагменты регулярного и нерегулярного мгновенных полей скорости, рассчитанных итерационным PIV-алгоритмом со смещением областей (рис. 5, *a*) и методом PTV (рис. 5, *b*). 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 известно, что вследствие вытесняющего эффекта пограничного слоя

Рис. 5. Фрагменты мгновенного поля скорости полученного итерационным алгоритмом (а), методом PTV (b).

частицы должны иметь поперечную составляющую скорости, направленную от стенки, которая не была зарегистрирована в экспериментах. Этот факт можно объяснить тем, что указанная составляющая скорости имеет величину, сравнимую со скоростью нарастания толщины пограничного слоя. В рассматриваемом случае она не превышает 1/100 продольной скорости потока, что составляет менее 0,1 пикс по абсолютному значению. Таким образом, она заведомо выходит за границы динамического диапазона метода и не могла быть зарегистрирована.

Профиль средней скорости $U=f(y)$ при $Re_\theta = 520$, определенный с помощью указанных выше алгоритмов по 500 парам изображений, представлен на рис. 6. Как видно, результаты обработки итерационным алгоритмом и методом PTV различаются

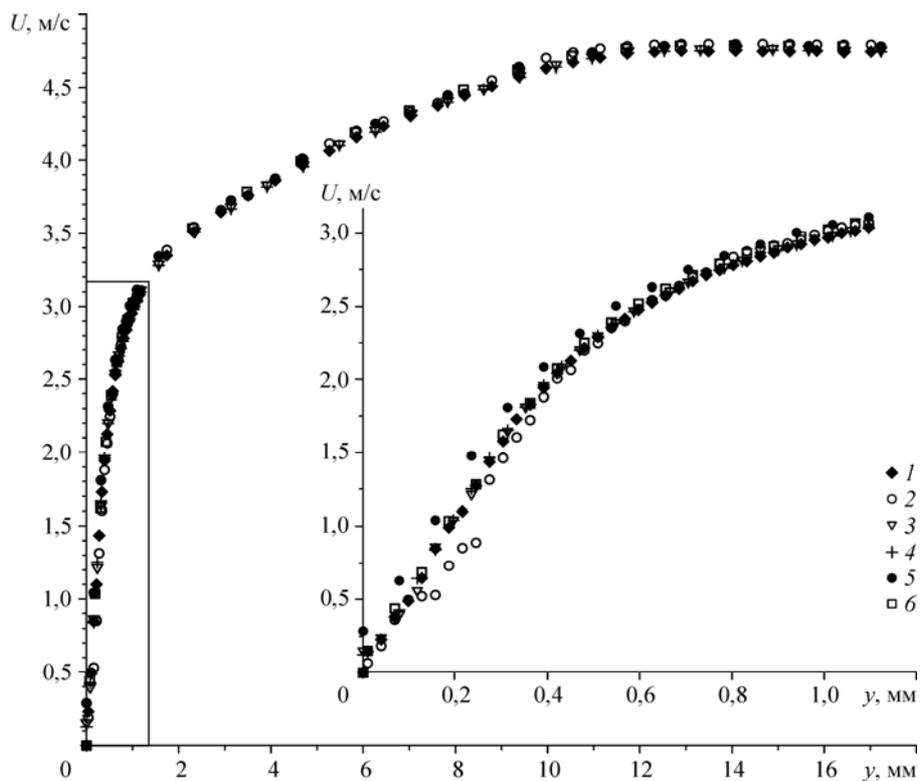
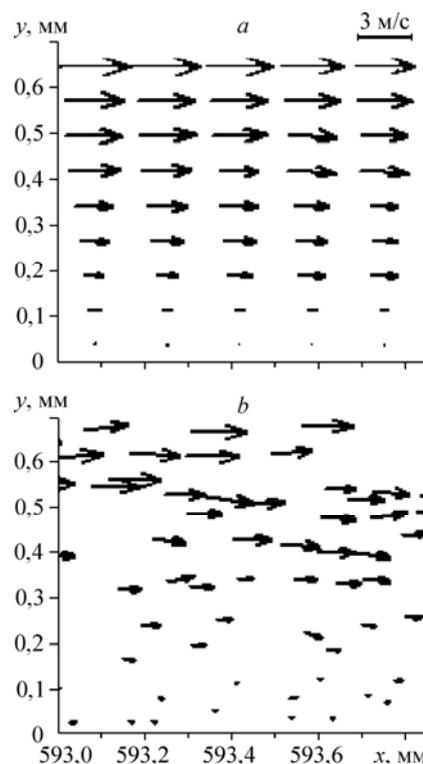


Рис. 6. Профиль средней скорости. $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с.

Итерационный алгоритм: 6×12 пикс (1), 8×16 пикс (3) — без компенсации градиента, 8×16 пикс — с компенсацией градиента (4); алгоритм с осреднением корреляционной функции: 6×12 пикс (2); PTV: 8×16 пикс (5); PTV: 6×12 пикс (6).

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 [19], вероятно, связано с возникновением на корреляционной функции двух пиков, соответствующих положительным и отрицательным пульсациям, вместо одного — соответствующего среднему значению скорости.

На рис. 7 для тех же условий эксперимента приведено распределение скорости в координатах закона стенки $U^+ = f(y^+)$, где $y^+ = yu_\tau/\nu$. Значение u_τ , из которого определялась динамическая скорость u_τ , получено из условия наилучшего совпадения измеренных значений U^+ с классическим логарифмическим законом распределения скоростей $U^+ = 5,62 \log(y^+) + 5,0$ на участке от $y^+ = 25$ до $y^+ = 65$ (метод диаграмм Клаузера [20]). Для сравнения на рис. 7 приведены также результаты прямого численного моделирования при $Re_\theta = 670$, заимствованные из работы [21].

Видно, что в логарифмической области пограничного слоя измеренный профиль скорости не содержит ничего неожиданного и вполне соответствует универсальному закону распределения скоростей. Анализ показывает, что максимальное отклонение экспериментальных значений U^+ от универсальной зависимости (для указанной области) не превышает величины $\pm 2,5\%$. Отсюда ясно, что и погрешность определения касательного напряжения, которое в исследуемом случае составило $\tau_w = 0,066 \text{ кг/м}\cdot\text{с}^2$, что соответствует локальному значению коэффициента поверхностного трения $C_f = 5,9 \times 10^{-3}$, также не превышает отмеченной величины.

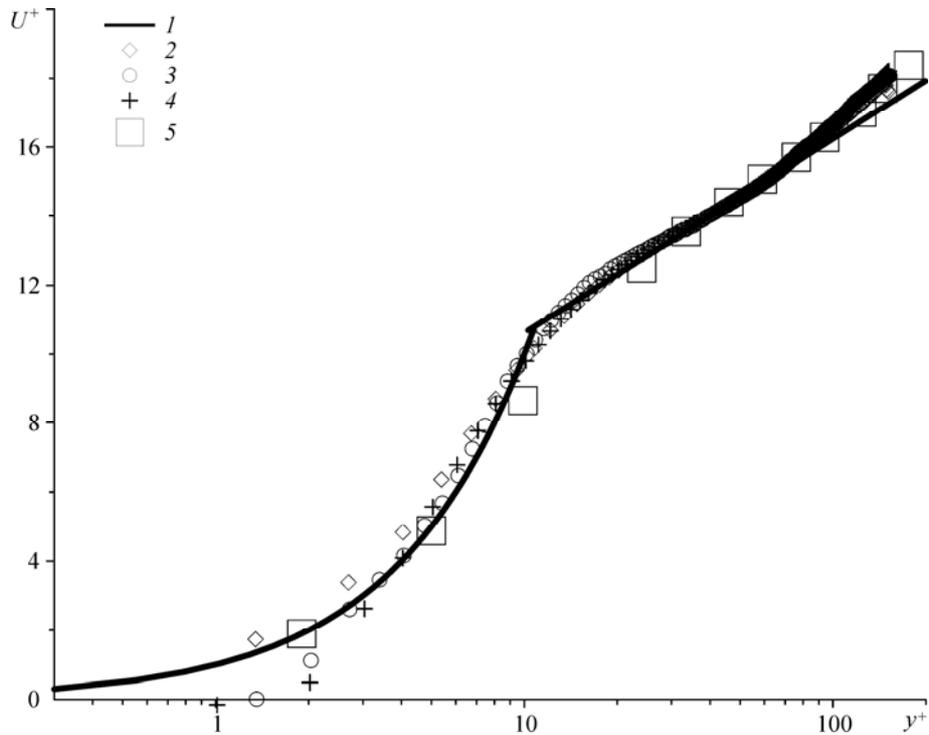


Рис. 7. Профиль средней скорости в безразмерных координатах. $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с. Универсальный закон распределения скоростей (1), итерационный алгоритм без компенсации градиента (2), алгоритм с осреднением корреляционной функции (3), двухкадровый PTV (4), результаты численного моделирования работы [21] (5).

В то же время в вязком подслое наблюдается характерное завышение значений скорости, выявленное также в более ранних работах [5, 6]. Это может быть обусловлено градиентом скорости, наибольшие значения которого реализуются вблизи стенки. Действительно, как следует из работ [11, 6], наибольшая погрешность корреляционных методов обработки изображений возникает именно при наличии больших градиентов скорости. Заметим также, что при обработке изображений итерационным алгоритмом процедура компенсации градиента не привела к существенному изменению результатов по сравнению с итерационным алгоритмом без использования указанной процедуры. Это объясняется тем, что алгоритм компенсации градиента основывается на расчете поправки первого порядка к начальному полю скоростей, и, таким образом, не способен обеспечить коррекцию результатов в случае, если начальная оценка скорости оказывается смещенной для всех соседних областей (как это и происходит в нашем случае). В целом, следует отметить, что применение итерационного кросскорреляционного 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.

На основании результатов обработки методом PIV с непрерывным смещением областей и методом PTV были рассчитаны также пульсационные характеристики исследуемого течения. В частности, на рис. 8 представлен профиль продольной компоненты пульсаций скорости в переменных закона стенки $u^+ = f(y^+)$, где

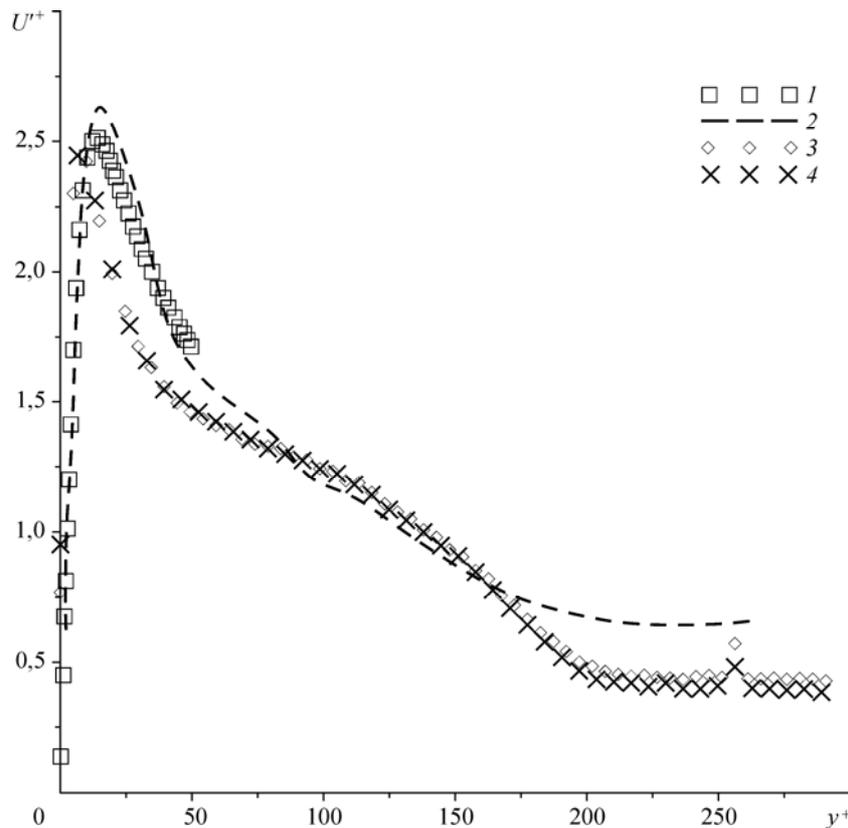


Рис. 8. Профиль пульсаций продольной компоненты скорости. $Re_\theta = 520$, $U_\infty = 4,3$ м/с. Результат работ [21] при $Re = 300$ (1), [22] (2), методы: PTV (3), PIV (4).

$u^+ = \sqrt{u'^2} / u_\tau$. Как видно, в целом полученный профиль турбулентных пульсаций скорости $u^+ = f(y^+)$ соответствует результатам термоанемометрических измерений [22], и данным прямого численного моделирования [21], и в принципе не содержит ничего неожиданного, если иметь в виду следующее обстоятельство. В разделе 1.2 отмечалось, что начальная турбулентность потока в нашей аэродинамической трубе оценивалась величиной порядка 2 %. По этой причине в области течения, характеризующейся поперечной координатой $y^+ \geq 210$, измеренный уровень пульсаций u соответствует некой постоянной величине, обусловленной повышенным уровнем турбулентности потока в самой установке. С другой стороны, известно, что одной из особенностей распределения продольных пульсаций скорости является слабое изменение их величины в окрестности максимума при изменении турбулентности внешнего потока. В литературе можно встретить данные, в соответствии с которыми изменение степени турбулентности внешнего потока, даже на два порядка, приводит всего лишь к 23 % разнице в величине u^+ , что свидетельствует о явной консервативности u^+ вблизи максимума пульсаций. Таким образом, хотя в нашем случае имеющееся отличие в u^+ от результатов других авторов [21, 22] не вызывает опасения, оно вполне объяснимо и естественно. Что касается местоположения максимума пульсаций по координате y^+ , то оно не должно зависеть ни от числа Рейнольдса, ни от степени турбулентности потока и, согласно данным многих работ, соответствует величине $y^+_{\max} \approx 15$, тогда как в нашем случае $y^+_{\max} \approx 10$. Ясно, что это требует дальнейшего совершенствования методики измерений.

Выводы

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.

Результаты экспериментов указывают на принципиальную возможность получения информации о полях скорости в турбулентном пограничном слое методами цифровой трассерной визуализации. Обнаружено, что при выборе расчетной области одинаковых размеров (в случае PTV — области, по которой производится осреднение при регуляризации) использование кросскорреляционного итерационного алгоритма и PTV приводят к сходным результатам и обеспечивают приемлемую точность измерений скорости даже в вязком подслое. Полученные профили средней скорости позволяют с достаточной точностью определять локальные значения касательного напряжения τ_w , используя для этого логарифмическую область пограничного слоя, однако, в связи с существующим разбросом значений скорости вблизи стенки, определение τ_w на основании измерений в вязком подслое пока еще остается проблематичным. При этом применение PTV позволяет использовать область меньших размеров, повышая, таким образом, пространственное разрешение. Дальнейшее увеличение пространственного разрешения может быть достигнуто путем использования гибридного алгоритма, предусматривающего расчет нерегулярного поля скоростей методом PTV на основании предварительно рассчитанного PIV-алгоритмом регулярного поля [23]. 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 кросскорреляционного алгоритма и метода PTV, разбросу значений скорости.

Список литературы

1. Fernholz H.H., Finley P.J. The incompressible zero-pressure gradient turbulent boundary layer: an assessment of the data // Prog. Aerospace Sci. 1995. Vol. 32. P. 245–311.
2. 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 Inter. Symp. on Particle Image Velocimetry. USA, Pasadena, California, 2005.
3. Kähler C.J. Investigation of the spatio-temporal flow structure in the buffer region of a turbulent boundary layer by means of multiplane stereo PIV // Experiments in Fluids. 2004. No. 36. P. 114–130.
4. Lin J., Foucaut J.-M., Laval J.-P., Perenne N., Stanislas M. Assessment of different SPIV processing methods for an application to near-wall turbulence // Topics in Applied Physics. 2008. Vol. 112. P. 191–221.
5. 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 Conf., Gold Coast, Queensland, Australia, 2007.
6. 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. Berlin: Springer, 2004. P. 163–86.
7. Kähler C.J. General design and operating rules for seeding atomizers // PIV'03 Paper 32075th Inter. Symp. on Particle Image Velocimetry, Busan, Korea, 2003.
8. McNeil C.M., Peltier D.W., Reeder M.F., Crafton J.W. Clean seeding for Particle Image Velocimetry // 22nd Inter. Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, CA, 12-14 June, 2007.
9. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (Actual Flow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7. С. 79–85.
10. 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.
11. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry: a practical guide. 2nd Ed. Berlin: Springer. 2007. Vol. XX. 448 p.
12. Scarano F., Riethmuller M.L. Advances in iterative multigrid PIV image processing // Experiments in Fluids. 2000, Vol. 29, Suppl. 1. P. 51–60.
13. Scarano F. Iterative image deformation methods in PIV // Review Article Meas. Sci. Technol. 2002. Vol. 3. P. R1–R19.
14. Meinhart C.D., Wereley S.T. A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields // J. of Fluids Engng. 2000. Vol. 122 (2). P. 285–289.
15. Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G. Micron resolution velocimetry techniques // Selected papers from the 9th Int. Symp. on Appl. of Laser Techn. to Fluid Mech, Germany. Berlin: Springer, 2000.
16. 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.
17. Kim B.J., Sung H.J. A further assessment of interpolation schemes for window deformation in PIV // Experiments in Fluids. 2006. Vol. 41. P. 499–511.
18. Estrada-Perez C.E., Dominguez Ontiveros E.E., Hassan Y.A., Ortiz-Villafuerte J. Near-wall study of turbulent channel flows with an improved PTV algorithm // Proc. 6th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, 23-25, September, 2005.
19. Poelma C., Westerweel J. Generalized displacement estimation for averages of non-stationary flows // Experiments in Fluids. 2011. Vol. 50, No. 5. P. 1421–1427.
20. Clauser F.H. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // J. Aero. Sci. 1954. Vol. 21. P. 91–108.
21. Spalart P.R. Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $Re_\theta = 1410$ // J. Fluid Mech. 1988. Vol. 187. P. 61–98.
22. Ching C.Y., Djenidi L., Antonia R.A. Low-Reynolds-number effects in a turbulent boundary layer // Experiments in Fluids. 1995. Vol. 19. P. 61–68.
23. Cowen E.A., Monismith S.G. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique // Experiments in Fluids. 1997. Vol. 22. P. 199–211.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2011 г.