

УДК 532.517

## ПРОФИЛИ СКОРОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД ПЛАСТИНОЙ С УГЛУБЛЕНИЕМ

В. В. БАБЕНКО, А. В. ВОСКОВОЙНИК,  
В. А. ВОСКОВОЙНИК, В. Н. ТУРИК

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Получено 05.04.2004 ◊ Пересмотрено 16.06.2004*

В аэродинамической трубе открытого типа проведены термоанемометрические измерения поля скоростей над пластиной с локальным углублением. Исследования выполнены для ламинарного и турбулентного режимов обтекания в диапазоне чисел Рейнольдса по длине пластины (от ее начала до местоположения углубления)  $4 \cdot 10^4 \div 7 \cdot 10^5$ . Представлены профили осредненной продольной скорости и дефекты осредненной и пульсационной составляющих продольной скорости вдоль пластины и над углублением. Показано, что поперечно обтекаемое полужидкостное углубление на плоской поверхности вызывает изменения в структуре пограничного слоя, образуя вблизи пластины области торможения и ускорения набегающего потока. С увеличением скорости обтекания эти области распространяются на всю толщину пограничного слоя. Изменение структуры пограничного слоя порождает дополнительные источники гидродинамического шума, имеющего звуковую и псевдозвуковую природу.

В аеродинамічній трубі відкритого типу проведені термоанемометричні вимірювання поля швидкостей над пластиною з локальним заглибленням. Дослідження виконані для ламінарного й турбулентного режимів обтікання у діапазоні чисел Рейнольдса по довжині пластины (від її початку до місцезнаходження заглиблення)  $4 \cdot 10^4 \div 7 \cdot 10^5$ . Наведені профілі осередненої повздовжньої швидкості і дефекти осередненої та пульсаційної складових повздовжньої швидкості вздовж пластины і над заглибленням. Показано, що напівциліндричне заглиблення на плоскій поверхні, яка обтікається поперечним струменем, викликає зміни у структурі прилежового шару, утворюючи поблизу пластины області гальмування та прискорення набігаючого струменя. При збільшенні швидкості обтікання ці області поширюються на всю товщину прилежового шару. Зміна структури граничного шару породжує додаткові джерела гідродинамічного шуму, який має звукову та псевдозвукову природу.

The hot-wire anemometry measurements of the velocity field above the plate with local cavity are carried out in open wind tunnel. The investigations are held for laminar and turbulent flows in the range of the Reynolds numbers with respect to plate length (from its start to the cavity site)  $4 \cdot 10^4 \div 7 \cdot 10^5$ . Mean longitudinal velocity profiles and the defects of mean and fluctuational longitudinal velocity components along the plate and above the cavity are presented. It is shown that the cross-streamlined half-cylindrical cavity on the plane surface changes the boundary layer structure, forming the stream braking and acceleration areas in the vicinity of the plate. With the increase of the flow velocity these areas extend to all thickness of the boundary layer. Changes in the boundary layer structure generate the additional sources of hydrodynamic noise having the sound and pseudo-sound nature.

### ВВЕДЕНИЕ

Углубления различной формы и конфигурации часто встречаются на обтекаемых поверхностях летательных аппаратов, надводных и подводных судов. В зависимости от режимов обтекания и геометрических параметров таких геометрических неоднородностей, внутри них формируются сложные вихревые течения. При достаточно высоких скоростях потока происходит отрыв пограничного слоя с передней кромки углубления и его удар о заднюю (кормовую) часть. При этом внутри выемки образуется циркуляционное течение, порождающее крупномасштабные вихревые системы и мелкомасштабные вихри, количество которых увеличивается с ростом скорости обтекания [1–5]. Взаимодействие вихревых структур слоя смешения, образуемого при отрыве пограничного слоя, с кормовой стенкой геометрической неоднородности обтекаемой поверхности приводит к генерированию автомодельных колебаний внутри углубления [6–10]. При этом происходит периодический

выброс вихревых систем в пограничный слой, формируемый над обтекаемой поверхностью. Таким образом, наличие локальных углублений вызывает определенные изменения в структуре пограничного слоя над всей поверхностью. Это порождает дополнительные источники когерентного широкополосного гидродинамического шума пограничного слоя, имеющего звуковую и псевдозвуковую природу. Если обтекаемая поверхность достаточно гибкая, то возникают относительно высокие уровни ее вибраций [7, 10–12]. Несмотря на многообразие полученных теоретических и экспериментальных результатов, кинематическая структура потока, обтекающего поверхности с локальными углублениями, изучена недостаточно.

В данной работе приводятся результаты исследования влияния локального углубления на обтекаемой поверхности на кинематические характеристики пограничного слоя для различных режимов обтекания. Серия экспериментов выполнена на специально созданной аэродинамической установке открытого типа. В ходе исследования про-

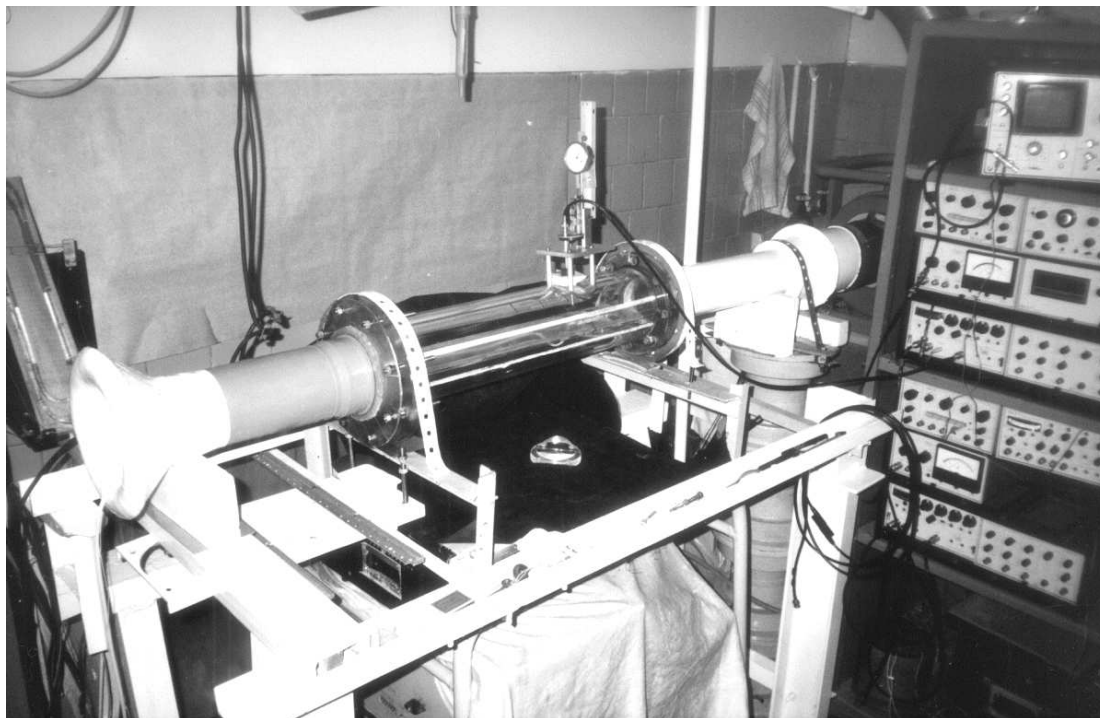


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда

ведены термоанемометрические измерения полей скоростей над обтекаемой плоской пластиной с полуцилиндрическим углублением, поперечно расположенным к направлению набегающего потока. Анализ полученных результатов дал возможность оценить основные особенности изменения профилей продольной скорости как над обтекаемой поверхностью плоской пластины, так и над полуцилиндрическим углублением.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты выполнялись на стенде, представляющем собой аэродинамическую трубу открытого типа. При проведении исследований температура и влажность воздуха, образующего аэродинамический поток в трубе, были практически неизменными. На протяжении всей серии экспериментов проводился постоянный контроль этих величин, а также атмосферного давления. При отклонении того или иного параметра незамедлительно вводились поправки в соответствующие коэффициенты при калибровке или аттестации испытательных устройств и приспособлений. Все изменения параметров учитывались при определении чувствительности первичных

преобразователей измеряемых величин, а также их амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик непосредственно в ходе измерений.

Аэродинамическая труба кругового сечения (рис. 1) имела внутренний диаметр  $d_0 = 102$  мм. Измерительный участок был выполнен в виде прозрачного цилиндра из оргстекла с тем же внутренним диаметром и длиной 700 мм. Для обеспечения безотрывного входа воздушного потока в установку перед измерительным участком располагался входной участок длиной 400 мм, начинающийся с воздухозаборника длиной 100 мм, спрофилированного по закону лемнискаты [13, 14]. В кормовой части измерительный участок соединялся с прямолинейным участком аэродинамической трубы с тем же диаметром и длиной, превышающей пять его калибров. Далее, через диффузор и резиновую вибродемпфирующую вставку рабочий участок трубы присоединялся к всасывающему патрубку центробежного вентилятора.

В осевом сечении измерительного участка аэродинамической трубы в ее горизонтальной плоскости вдоль продольной оси монтировалась плоская гидравлически гладкая пластина (высота шероховатости ее поверхности не превышала толщины вытеснения пограничного слоя), выполненная из

листового оргстекла толщиной 4 мм. Она имела ширину, равную внутреннему диаметру трубы, и длину 635 мм. Носовая и кормовая части пластины были заострены для обеспечения их безотрывного обтекания.

На обтекаемой поверхности пластины в специально сделанной нише устанавливался полиуретановый полуцилиндр. Он закреплялся в утопленном положении внутри прямоугольного параллелепипеда (короба), изготовленного из оргстекла. В свою очередь, короб приклеивался к нижней (нерабочей) стороне пластины (рис. 2). Продольная ось полуцилиндрического углубления располагалась на удалении 514 мм от переднего края пластины перпендикулярно скорости набегающего воздушного потока  $U_\infty$ . Радиус углубления составлял  $R = 9.25$  мм, а глубина и длина – 11.5 и 81 мм соответственно. Торцевые стенки углубления были плоскими и перпендикулярными к продольной оси углубления, а поверхность – гидравлически гладкой.

В верхней части прозрачного измерительного участка аэродинамической трубы (см. рис. 1) устанавливалось координатное устройство, в котором с помощью соответствующих державок и узлов крепления фиксировались проволочные термоанемометрические датчики фирмы Диза (Дания). Координатное устройство, оборудованное микрометрическими головками, обеспечивало линейные перемещения термоанемометрических датчиков с погрешностью 0.01 мм. Установка датчиков над исследуемой поверхностью, а также расположение измерительной пластины контролировались с помощью лазерного луча, который через систему зеркал и расщепителей светового луча направлялся в места установки пластины или датчика. Это позволило добиться погрешности установки указанных устройств, не превышающей 0.01 мм.

В исследованиях использовались однониточные проволочные термоанемометрические датчики двух длин – 1 и 1.1 мм – при диаметре 0.005 мм. Соотношение длины чувствительного элемента к толщине превосходило 200. Такое соотношение рекомендуется для обеспечения равномерного теплообмена с обтекаемой поперечным потоком проволоки и уменьшения влияния токопроводящих и относительно массивных ножек датчика [13–16]. В измерениях использовалась проволока из двух материалов – волластоновского сплава (90 % вольфрама и 10 % платины) и тугоплавкого чистого вольфрама. Проволочки приваривались к торцам ножек термоанемометрического датчика с помощью точечной сварки.

Электрические сигналы от проволочных датчи-

ков поступали на комплект термоанемометрической аппаратуры фирмы Диза, работающей в режиме постоянной температуры. Калибровка термоанемометрических датчиков проводилась как абсолютным, так и относительным методами. Абсолютный метод был реализован с помощью специальной калибровочной аэродинамической трубы фирмы Диза, в которой скорость воздушного потока регулировалась. Кроме того, калибровка проводилась на вращающемся стенде, позволяющем изменять число оборотов диска, где монтировался калибруемый датчик скорости, а также радиус установки датчика на диске. Это давало возможность изменять окружную скорость диска и линейную скорость перемещения калибруемого датчика в широких пределах. Относительный метод заключался в сопоставлении данных о скорости, регистрируемых посредством калибруемого датчика, с эталонным измерителем скорости [17]. Для этого в измерительном участке аэродинамической трубы навстречу набегающему потоку воздуха располагались рядом друг с другом калибруемый проволочный термоанемометр и трубка Пито.

В результате этих мероприятий удалось обеспечить приемлемые условия проведения экспериментальных исследований и достаточно высокую степень точности и повторяемости результатов. Это позволило проводить статистический анализ полученных данных, которые регистрировались в течение одного замера не менее минуты. Степень турбулентности набегающего потока в месте проведения исследований на пластине не превышала 3–4 %. Уровни акустического излучения в районе углубления составляли не более 90 дБ относительно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па в диапазоне частот  $20 \div 20000$  Гц. Уровни вибраций исследуемой пластины относительно ускорения свободного падения  $g$  были не более –60 дБ в направлении  $x$ , не более –55 дБ в направлении  $y$  и не более –57 дБ в направлении  $z$ . Уровни вибраций самого измерительного участка аэродинамической трубы и координатного устройства не превышали –55 дБ относительно  $g$ . Все уровни вибраций измерялись в частотном диапазоне от 2 Гц до 12.5 кГц. Погрешность измерений осредненных и интегральных величин не превышала 10 % (доверительный интервал 95 %).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Профили осредненных значений продольных скоростей вдоль обтекаемой поверхности пластины с углублением представлены на рис. 3–5 для скоростей набегающего потока 1.1, 10.1 и 20.1 м/с

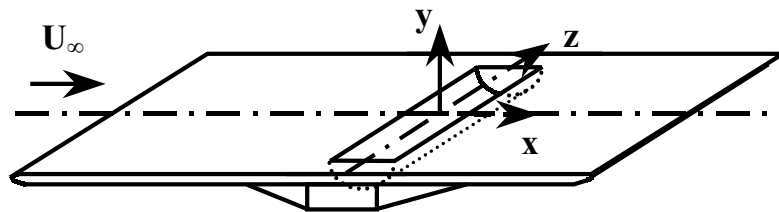


Рис. 2. Схема расположения углубления на пластине и используемая система координат

соответственно. Иллюстрации на этих рисунках разделены на четыре характерных участка:

- обтекание пластины перед углублением;
- течение над передней частью углубления;
- течение над задней частью углубления;
- обтекание пластины позади углубления.

На этих рисунках по оси ординат отложены координаты, направленные по нормали к исследуемой пластине, обезразмеренные толщиной пограничного слоя. Толщина пограничного слоя определялась как расстояние, на котором местная осредненная скорость составляла 95 % скорости набегающего потока. Над углублением профили скорости даны только для положительных значений координаты  $y$ . По оси абсцисс отложены безразмерные осредненные скорости  $U/U_\infty$ . Представленные профили скорости получены для сечений пограничного слоя от  $x/R = -7.243$  до  $7.243$ . Плоскость выемки располагается в координатах  $x/R$  от  $-1.0$  до  $1.0$  (начало координат в центре углубления, рис. 2). На рис. 3, а, 4, а и 5, а для сравнения показаны профили ламинарного пограничного слоя (профиль Блазиуса) и турбулентного – для “закона одной седьмой” ( $U/U_\infty = (y/\delta)^{1/7}$ ) [18, 19].

При малой скорости обтекания измеренные профили скорости по характеру своего поведения более соответствуют ламинарному режиму обтекания (см. рис. 3, а). Профиль скорости в сечении  $x = -7.243R$  находится между зависимостями для ламинарного и турбулентного пограничных слоев. С приближением к выемке профили становятся менее заполненными относительно ненарушенного пограничного слоя ( $x = -7.243R$ ). Это свидетельствует о тормозящем воздействии углубления на пограничный слой перед ним. Максимальное торможение течение испытывает непосредственно вблизи выемки ( $x = -1.081R$ ), особенно в пристеночной области пограничного слоя. В этом место-

положении профили осредненной скорости практически полностью совпадают с профилем Блазиуса для ламинарного режима обтекания. За передней кромкой углубления, где происходит отрыв пограничного слоя, профиль скорости заполняется. Следовательно, здесь формируется область ускорения потока, набегающего на выемку.

На рис. 3, б представлены профили скорости для передней части поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавки, а именно, для сечений от  $x = -0.973R$  до ее центра. В средней части пограничного слоя, после его отрыва, профили скорости вновь становятся менее заполненными. Наибольшее торможение потока над передней или диффузорной частью выемки наблюдается в сечении  $x \approx -0.5R$ . В плоскости пластины поток после отрыва, наоборот, ускоряется (см. сечения с координатой  $y = 0$ ), достигая своего наибольшего значения в местоположении  $x = -0.324R$ . Необходимо отметить, что в сечении  $x/R = -0.324$  профиль является наиболее заполненным. Далее, при приближении к осевой области углубления вновь отмечается торможение потока практически по всему сечению пограничного слоя. Особенно сильно это заметно в районе  $y/\delta \approx 0.4$ . При  $y = (0.3 \div 0.5)\delta$  зарегистрирован ярко выраженный перегиб профиля скорости, свидетельствующий о неустойчивом режиме обтекания в этом местоположении над углублением [20–22]. Таким образом, над диффузорной частью выемки в пограничном слое отмечается чередование областей торможения и ускорения набегающего потока, а в слое смешения – незначительное ускорение течения (в области ближнего следа). Затем, в диапазоне значений  $x/R$  от  $-0.5$  до  $-0.3$  и далее, ближе к центру углубления наблюдается небольшое притормаживание потока. На уровне поверхности пластины по оси слоя смешения ( $y = 0$ ) осредненная скорость возросла от  $0.1U_\infty$  до  $0.3U_\infty$  с большим темпом во второй (по направлению потока) половине передней части углубления.

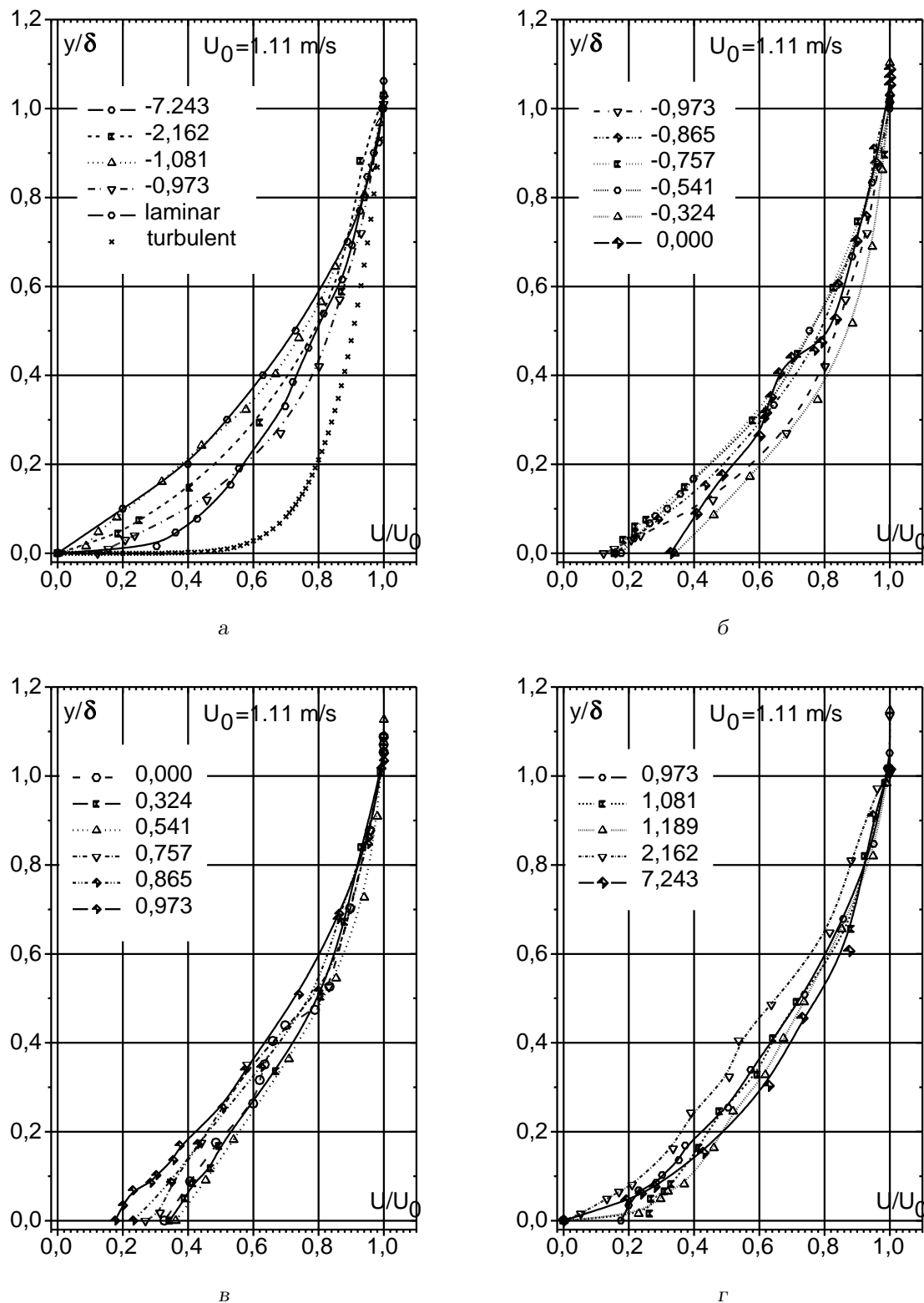
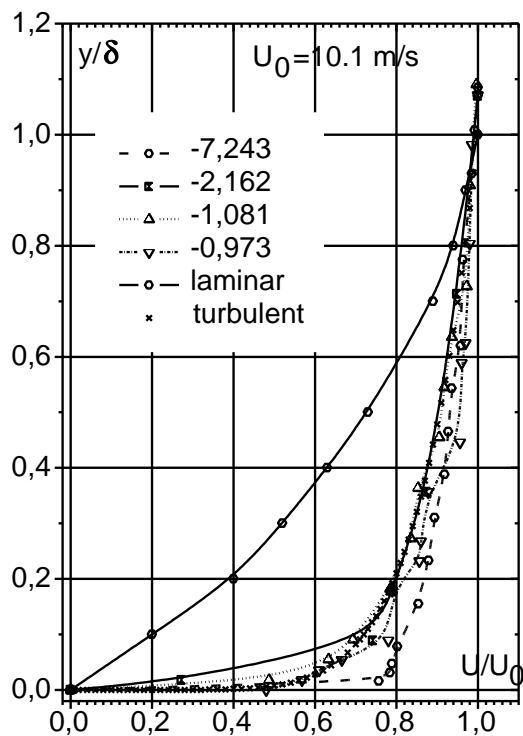
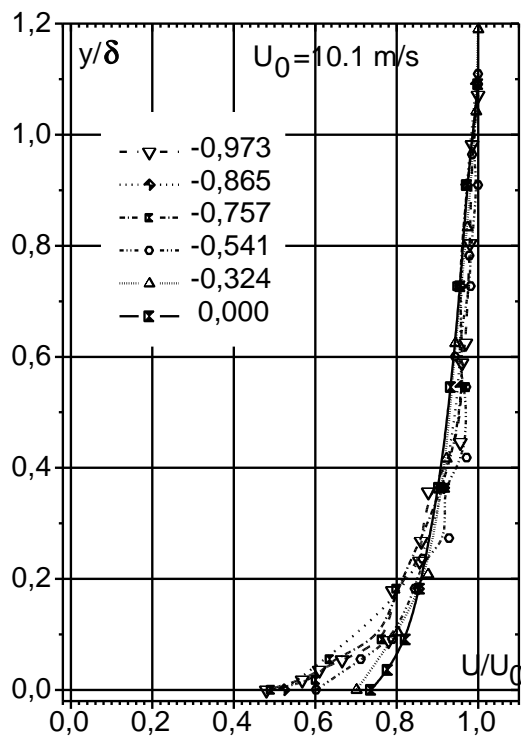


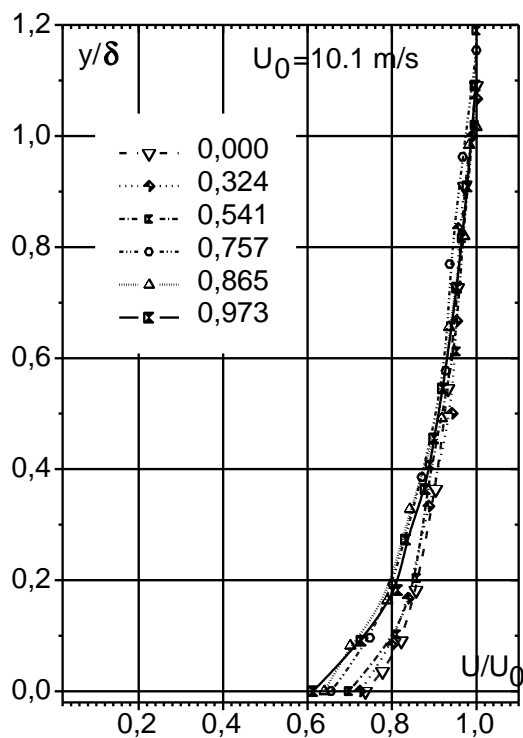
Рис. 3. Профили осредненной продольной скорости над плоской пластиной и полуцилиндрическим углублением на ней для скорости обтекания 1.11 м/с:  
 а – перед углублением, б – над передней частью углубления,  
 в – над кормовой частью углубления, г – позади углубления



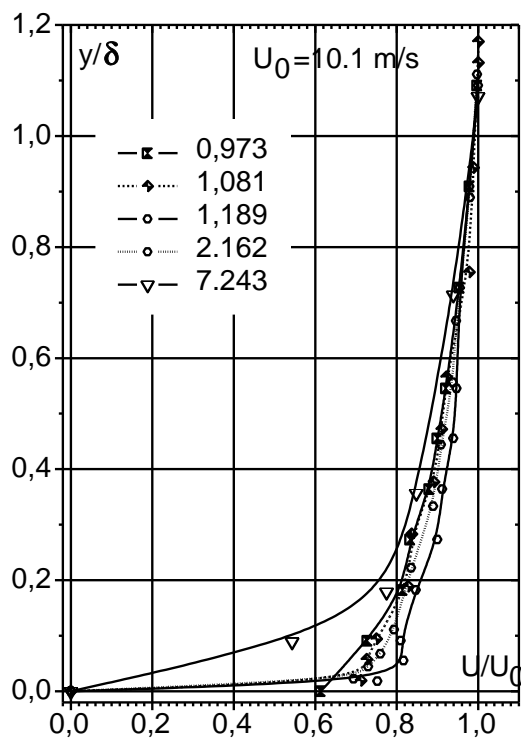
а



б



в



г

Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для скорости обтекания 10.1 м/с

Над конфузурной (сужающейся) частью выемки, при удалении от центра выемки до половины ее кормовой части (рис. 3, в), поток снова ускоряется. При переходе в область ударного взаимодействия поток вновь тормозится. Профили скорости в сечениях  $0.75R$  и  $0.97R$  имеют незначительные перегибы. Первый из них находится в центральной части пограничного слоя и вблизи оси слоя смешения, а второй – только в пристеночной области, обусловленный ударным взаимодействием потока и стенки. В сечении на уровне поверхности пластины ( $y=0$ ) осредненная скорость сначала несколько возрастает до  $0.36U_\infty$  при  $x=0.541R$ , а затем падает до  $0.18U_\infty$  вблизи задней критической точки углубления, где происходит взаимодействие набегающего потока или слоя смешения с кормовой стенкой выемки.

На рис. 3, г представлены данные для профилей местных осредненных скоростей пограничного слоя на пластине непосредственно за полуцилиндрической выемкой. Отметим, что все приведенные профили скорости в той или иной степени имеют перегибы, а некоторые – даже несколько (скажем, для сечения  $x=2.162R$ ). Это говорит о высокой степени неустойчивости течения жидкости или газа позади выемки (в ее ближнем следе). Здесь происходит интенсивное взаимодействие вихревых структур, порождаемых внутри обтекаемого углубления, с набегающим на пластину потоком [1, 2, 6, 8]. Эта неустойчивость сильно влияет на пограничный слой вблизи обтекаемой поверхности сразу за выемкой. С удалением от нее неустойчивость больше проявляется на внешней границе пограничного слоя (на этой скорости обтекания он более устойчив перед углублением, см. рис. 3, а). К сожалению, по ряду технических причин в данных исследованиях нам не удалось проследить за развитием пограничного слоя и степенью его устойчивости на большем расстоянии вниз по потоку за выемкой. В частности, мы не смогли определить, на каком удалении пограничный слой восстанавливается, а влияние углубления на него исчезает.

Как и на предыдущих графиках, на рис. 3, г наблюдаются области торможения и ускорения потока по толщине пограничного слоя. Так, за канавкой до  $x=1.2R$  ускорение проявляется, главным образом, в его внутренней области. С удалением от этого сечения поток тормозится по всей толщине пограничного слоя. При этом профиль осредненной скорости приближается по своей форме к ламинарному. Далее, в последнем сечении измерений (порядка четырех калибров углубления), поток вновь ускоряется, но, фактически, только в средней части пограничного слоя, несколько за-

полняя профиль скорости.

Следовательно, из приведенных на рис. 3 данных можно утверждать, что для скорости течения  $U_\infty = 1.1$  м/с профили местной осредненной скорости (по крайней мере, непосредственно перед углублением и за ним) больше соответствуют ламинарным профилям обтекания пластины, чем турбулентным. Они периодически заполняются, а затем возвращаются в исходное состояние по мере продвижения вдоль обтекаемой поверхности пластины с полуцилиндрической выемкой. Это позволяет определить области или очаги ускорения и торможения потока в пограничном слое над пластиной с локальным углублением. Под влиянием этого углубления или, вернее сказать, вихревых процессов и особенностей поведения набегающего потока в нем, в пограничном слое появляются зоны неустойчивости. Последние проявляются как по всему сечению пограничного слоя (см., например,  $x=2.19R$ ), так и в отдельных его частях. Также неустойчивость наблюдается в слое смешения, образованном при взаимодействии набегающего потока с циркуляционным движением в углублении и зарождающимся при отрыве пограничного слоя с передней кромки выемки.

Профили продольной компоненты осредненной скорости, полученные при  $U_\infty = 10.1$  м/с, представлены на рис. 4. На рис. 4, а для сопоставления вновь изображены соответствующие ламинарный и турбулентный профили. Видно, что, в отличие от данных для  $U_\infty = 1.1$  м/с, кривые здесь сгруппированы вблизи турбулентного профиля скорости. На значительном удалении от выемки вверх по потоку ( $x=-7.243R$ ) профили скорости наиболее заполнены. С приближением к углублению их заполненность снижается, что коррелирует с данными, представленными на рис. 3, а. Однако, в отличие от малой скорости обтекания, наименее заполненным теперь оказывается профиль для сечения  $x=-2.16R$ , а не для  $x=-1.08R$ . В целом же, по степени заполненности при  $U_\infty = 10.1$  м/с профили в большей мере приближены друг к другу, чем при малых скоростях обтекания (особенно во внешней и инерционной частях пограничного слоя). На расстоянии от стенки, равном  $0.4\delta$ , в профиле скорости для  $x=-1.08R$  появляется перегиб, а при удалении за передний отрывной край углубления ( $x=-0.97R$ ) – несколько перегибов. Они сосредоточены в инерционной или логарифмической области пограничного слоя, а также во внутренней части его внешней области, доходившей почти до  $0.5\delta$ . Перегибы в профилях скоростей наблюдаются вплоть до сечения  $x=-0.32R$ . Ансамбль кривых для сечений  $-0.97 \leq x/R \leq -0.54$

в плоскости пластины ( $y \approx 0$ ) менее заполнен, а местная осредненная продольная скорость на оси слоя смещения достигает значения порядка  $0.5U_\infty$ . С приближением к центру углубления профили в этой плоскости все более заполняются, отражая повышение продольной скорости до  $0.74U_\infty$  (при  $x = 0$ ). Они становятся монотонно изменяющимися (более гладкими) – исчезают перегибы.

В кормовой части выемки (рис. 4, в) можно заметить два семейства кривых, разделяющихся в слое смещения. Первая группа – это профили над центральной частью углубления ( $0 \leq x/R \leq 0.54$ ). Они являются более заполненными и пересекают ось  $y = 0$  со скоростями порядка  $0.7U_\infty$ . Вторая группа профилей (также три сечения) охватывает площадь над задней, ударной, поверхностью углубления. Эта группа профилей пересекает ось  $y$  при  $U/U_\infty \approx 0.64$ , оставаясь менее заполненной.

При переходе в область следа углубления (рис. 4, г) заполнение профилей сначала растет (до  $x = 1.19R$ ), а затем падает. Этот эффект обусловлен тормозящим воздействием выемки на более удаленную часть ее следа. В пристеночной области пограничного слоя за углублением (в его ближнем следе) имеет место перегиб профиля скорости для сечения  $x = 1.19R$ , отражающий неустойчивость течения в этой области.

Профили местной осредненной продольной скорости пограничного слоя для  $U_\infty = 10.1$  м/с менее “разбросаны” по своим значениям, чем при  $U_\infty = 1.1$  м/с. Они группируются вокруг классического турбулентного профиля, определенно по “закону одной седьмой”. Наблюдаются области торможения и ускорения жидкости, обусловленные влиянием поперечно обтекаемой полуцилиндрической выемки. Однако эти зоны ограничены, главным образом, пристеночной и логарифмической областями пограничного слоя. В пограничном слое над пластиной с углублениями появляются зоны неустойчивости. При  $U_\infty = 1.1$  м/с они сосредоточены преимущественно в кормовой части выемки в дальнем и ближнем ее следе, а при  $U_\infty = 10.1$  м/с проявляются в отрывной зоне выемки и, частично, в ближнем следе для пристеночной области пограничного слоя. Профили осредненной скорости пересекают ось слоя смещения (уровень обтекаемой поверхности пластины над выемкой) с различными продольными скоростями. Это отображает уровень кинетической энергии, расходуемой набегающим потоком на вихреобразование в выемке, а также на ударные нагрузки, передаваемые потоком на заднюю стенку углубления [23–26]. Удар создает не только акустические колебания, излучаемые в окружающее про-

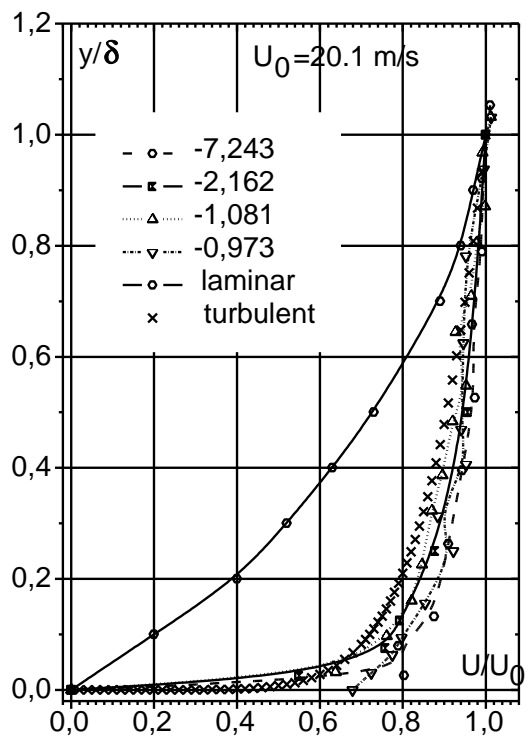
странство и на саму стенку выемки, но и образует мощные псевдозвуковые поля, переносимые движущейся жидкостью и переизлучаемые на обтекаемую поверхность [27–31]. Акустические и псевдозвуковые источники воздействуют на набегающий поток, в том числе, и на точку отрыва. Здесь формируется отрывное течение, очень чувствительное к таким типам возмущений. Хорошо известно, что псевдозвуковая составляющая гидродинамического шума, обусловленная нелинейным взаимодействием полей скоростей, присутствует и в ненарушенных пограничных слоях [32–35].

Профили местной осредненной продольной скорости для наибольшей из исследованных скоростей обтекания ( $U_\infty = 20.1$  м/с) представлены на рис. 5. Они имеют ярко выраженный турбулентный характер с большим заполнением профилей, чем при  $U_\infty = 10.1$  м/с. Это вполне естественно, поскольку с ростом  $Re_x$  проявляется большее заполнение профилей осредненной скорости [20, 22]. Также же, как и на предыдущих графиках, на рис. 5, а заполненность профилей убывает с приближением к исследуемому углублению. Это указывает на тормозящее воздействие выемки на набегающий поток вверх по течению от ее переднего края. За точкой отрыва в профиле продольной скорости наблюдается перегиб в районе  $0.25 \leq y/\delta \leq 0.4$ , и сечение  $y = 0$  поток пересекает со скоростью  $U/U_\infty = 0.67$ . Заметим, что эта величина существенно превосходит скорости, зафиксированные на рис. 3, а и 4, а.

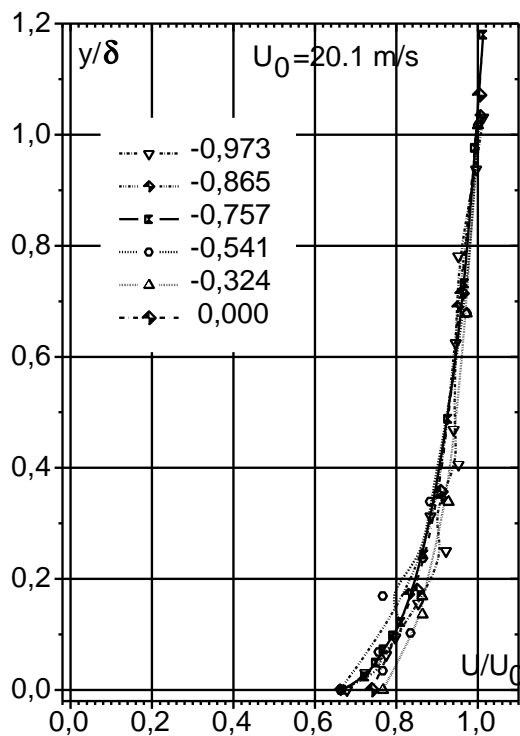
В передней части углубления (рис. 5, б) все приведенные профили осредненной продольной скорости близки друг к другу, за исключением области слоя смещения. Так, с приближением к центру поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавки продольная скорость в плоскости пластины  $y = 0$  возрастает до  $0.77U_\infty$  при  $x = -0.324R$ , а затем несколько падает в сечении  $x = 0$ . На высоте  $y = (0.15 \div 0.25)\delta$  наблюдается перегиб профиля скорости в сечении  $x = -0.541R$ , обуславливающий локальную неустойчивость пограничного слоя.

В кормовой части углубления (рис. 5, в) профили скорости сгруппированы слабее и указывают на области ускорения и торможения потока в пограничном слое над плоскостью канавки. С удалением от центра углубления поток тормозится (особенно во внешней области пограничного слоя). Затем он ускоряется вплоть до сечения над ударной стенкой канавки ( $x/R = 0.973$ ). На уровне поверхности пластины ( $y = 0$ ) течение за центром углубления сначала тормозится ( $U/U_\infty = 0.69$  при  $x = 0.324R$ ), затем ускоряется (до  $0.77U_\infty$  при  $x/R = 0.541$ ) и далее, с приближением к ударной стенке углубле-

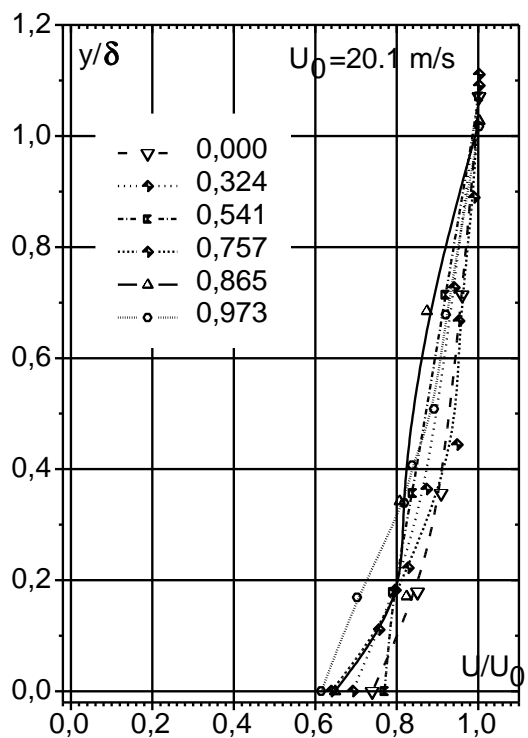




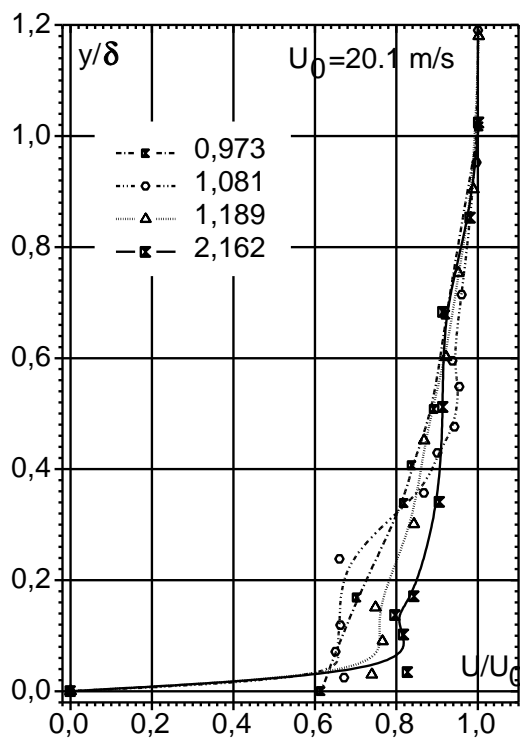
а



б



в



г

Рис. 5. То же, что и на рис. 3, но для скорости обтекания 20.1 м/с

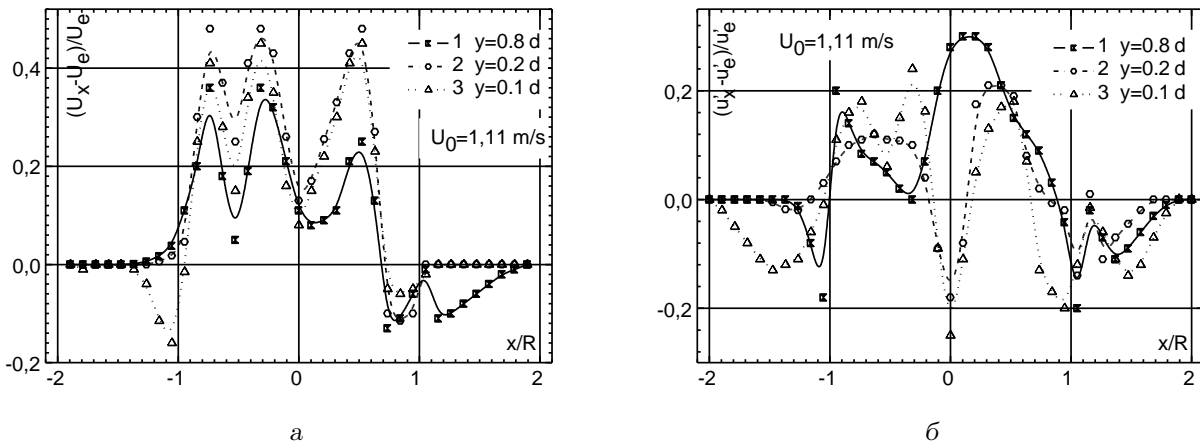


Рис. 6. Дефекты осредненных и пульсационных составляющих продольных скоростей над пластиной с углублением для скорости обтекания 1.1 м/с:

а – осредненная скорость, б – пульсации скорости

ния, снова тормозится (до  $0.61U_\infty$  при  $x=0.973R$ ).

В пограничном слое пластины за полуцилиндрическим углублением (рис. 5, г) зафиксированы значительные перегибы профилей продольной осредненной скорости, особенно во внутренней области пограничного слоя. С удалением от углубления поток, оставаясь неустойчивым, ускоряется. Это обеспечивает большую заполненность профиля осредненной скорости.

Анализ данных, приведенных на рис. 3–5, позволяет отметить следующие характерные особенности структуры пограничного слоя над пластиной с поперечно ориентированным полуцилиндрическим углублением. Во-первых, профиль осредненной продольной скорости, полученный при наименьшей исследуемой скорости обтекания  $U_\infty = 1.1$  м/с и при числе Рейнольдса в точке отрыва  $Re_x = xU_\infty/\nu = 3.7 \cdot 10^4$ , близок к профилю Блазиуса, который соответствует ламинарному режиму обтекания. С увеличением скорости обтекания до 10.1 и 20.1 м/с (числа Рейнольдса  $3.4 \cdot 10^5$  и  $6.7 \cdot 10^5$  соответственно) профили скорости приближаются к турбулентному режиму обтекания с возрастанием их заполненности при росте  $U_\infty$ . Во-вторых, при приближении к углублению, независимо от режима обтекания, обнаружено убывание заполненности профилей продольной осредненной скорости. Это указывает на тормозящее воздействие локального углубления на набегающий поток, особенно на пристеночную область пограничного слоя. В-третьих, как над пластиной с углублением, так и над самим углублением зарегистрированы области локального торможения

и ускорения набегающего потока, простирающиеся на всю толщину пограничного слоя. В-четвертых, в профилях местной осредненной продольной скорости наблюдаются перегибы кривых, характеризующие неустойчивость пограничного слоя. Неустойчивость присуща как ламинарному, так и турбулентному режимам обтекания пластины с углублением. В-пятых, непосредственно за точкой отрыва пограничного слоя относительная осредненная продольная скорость  $U/U_\infty$  возрастает от 0.12 до 0.68. В области ударного взаимодействия набегающего потока с кормовой стенкой углубления  $U/U_\infty$  растет с 0.18 до 0.61 при увеличении скорости обтекания от 1.1 до 20.1 м/с. Зафиксированы следующие значения максимальной продольной осредненной скорости на оси слоя смешения ( $y=0$ ):  $0.36U_\infty$  в сечении  $x=0.541R$  для  $U_\infty = 1.1$  м/с;  $0.74U_\infty$  в  $x=0$  для  $U_\infty = 10.1$  м/с;  $0.77U_\infty$  в  $x=-0.324R$ , а также  $x=0.541R$  для  $U_\infty = 20.1$  м/с.

Влияние локального поперечно обтекаемого препятствия в виде полуцилиндрической канавки на дефекты профилей скоростей пограничного слоя на пластине показано на рис. 6–8. Здесь представлены кривые изменения скоростей для продольной составляющей скорости в виде  $(U_x - U_e)/U_e$  (для осредненных значений  $U(x)$ ) и  $(\overline{u'_x - u'_e})/\overline{u'_e}$  (для пульсационной составляющей  $u'(x, t)$ ) в зависимости от расстояния  $x/R$ . Здесь  $U_e$  и  $\overline{u'_e}$  – осредненное значение продольной скорости и среднеквадратичное значение пульсаций продольной скорости в местоположении  $7R$  выше по потоку от углубления. На этих рисунках кривая 1 пред-

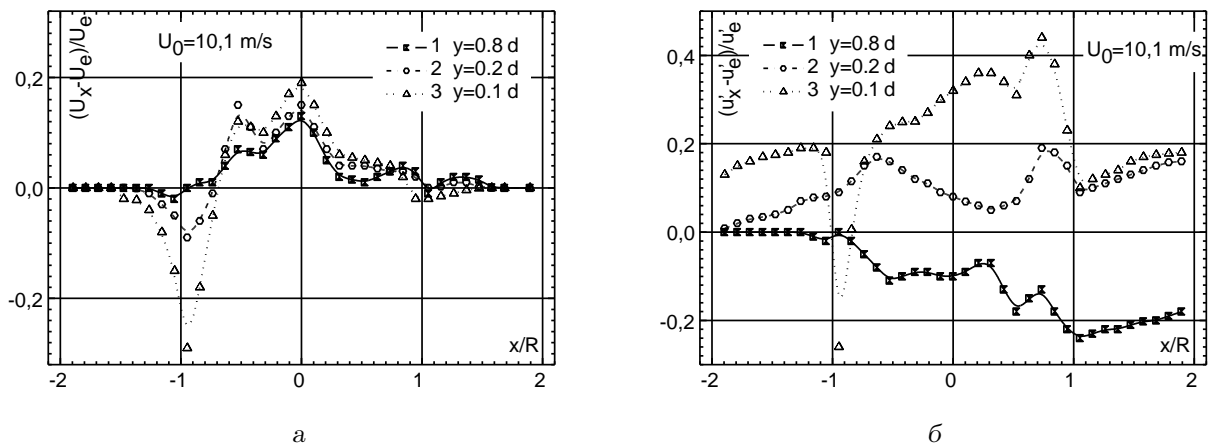


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но для скорости обтекания 10.1 м/с

ставляет собой данные для внешней области пограничного слоя на удалении по нормали от стенки  $y = 0.8\delta_{-R}$  ( $\delta_{-R}$  – толщина пограничного слоя на переднем срезе углубления  $x = -R$ ). Кривая 2 построена для инерционной области (внешней границы логарифмической области  $y = 0.2\delta_{-R}$ ), а кривая 3 – для внутренней или пристеночной области пограничного слоя  $y = 0.1\delta_{-R}$ .

При малой скорости обтекания  $U_\infty = 1.1$  м/с (рис. 6, а) наблюдается ускорение потока над выемкой вплоть до кормовой ее части. Исключение составляет пристеночная область, где осредненная скорость перед углублением снизилась (течение затормозилось). Минимальное значение продольной скорости в этом сечении пограничного слоя наблюдается при  $x = -1.08R$ . Как видно из приведенных данных, практически над всей канавкой (а точнее, почти над 85 % ее площади) в исследуемых сечениях пограничного слоя поток ускоряется, причем не равномерно, а по некоторому квазигармоническому закону. В носовой части выемки обнаружены две зоны максимума ускорения при  $x = -0.32R$  и  $-0.76R$ , а в кормовой – одна при  $x = 0.5R$ . Над кормовой частью канавки и непосредственно за ней до  $x = 1.08R$  во всех трех сечениях пограничного слоя наблюдается торможение потока. На внешней границе слоя имеется еще одна область торможения с максимумом при  $x = 1.2R$ . В соответствии с рис. 6, а, самые большие ускорения потока над углублением зарегистрированы в пристеночной области пограничного слоя ( $y = 0.2\delta_{-R}$ ) и наименьшие – во внешней его области. Наибольшее же торможение обнаружено в передней части канавки для внутренней области по-

граничного слоя, а в кормовой части – для внешней его области.

Пульсационные составляющие продольной скорости ведут себя несколько иначе, чем осредненные значения (см. рис. 6, б). Перед углублением зарегистрированы пониженные уровни пульсаций скорости не только в пристеночной области, но и по всему сечению пограничного слоя. Над поверхностью канавки пульсации во внешней области пограничного слоя возрастают так же, как и осредненные значения: с чередующимися зонами повышения и понижения пульсаций по направлению  $x$ . При этом на внешней границе пограничного слоя вблизи точки отрыва можно отметить высокий положительный градиент  $\partial \overline{u'}/\partial x$ . Во внутренней области пограничного слоя ( $y/\delta_{-R} \leq 0.2$ ) наблюдается прирост пульсаций скорости вдоль пластины до сечения  $x = 0.76R$  (подобно осредненным значениям скоростей). В районе осевого сечения углубления для  $y \leq 0.2\delta_{-R}$  зарегистрированы значительные (до 25 %) уровни снижения пульсаций скорости относительно условий ненарушенного пограничного слоя. Максимумы пульсаций продольной скорости и ее осредненных значений наблюдаются в тех же сечениях над углублением.

Над кормовой частью углубления, где имеет место ударное взаимодействие набегающего потока с поверхностью выемки, наблюдается понижение уровней пульсаций скорости (особенно для внутренней части пограничного слоя). Для внешней и инерционной областей пограничного слоя наибольшее понижение отмечается уже за пределами канавки (см. рис. 6, б). При  $x = 1.19R$  пульсации продольной скорости практически достигают зна-

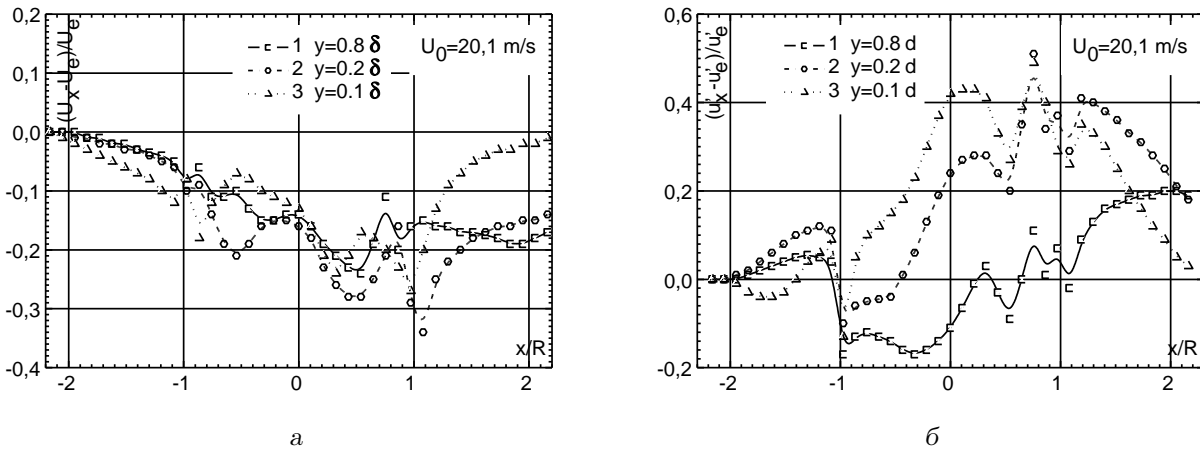


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но для скорости обтекания 20.1 м/с

чений, характерных для ненарушенного пограничного слоя при  $x = -7R$ . Далее по направлению набегающего потока наблюдается еще одна, последняя, волна падения пульсаций скорости за пределами полужидрической выемки.

С увеличением скорости обтекания влияние выемки на профиль скорости качественно остается таким же – ускорение и торможение потока. Амплитуды фазы ускорения при  $U_\infty = 10.1$  м/с (рис. 7, а) значительно уменьшаются, смещаясь ближе к кормовой части канавки. При этом наибольшие значения наблюдаются во внутренней области пограничного слоя. Максимум ускорения обнаружен при  $x = 0$ , т.е. над осью полужидрической выемки по всей толщине пограничного слоя. Областей торможения в кормовой части углубления в пределах точности измерений зафиксировано не было. По всему сечению пограничного слоя осредненные значения продольной составляющей скорости за углублением выходят на уровень ненарушенного пограничного слоя. Над передней частью выемки, сразу же за точкой отрыва, имеет место резкое торможение потока (до 30 % скорости в пристеночной области и до 10 % в логарифмической). Зона торможения во внутренней области пограничного слоя простирается от  $x = -1.5R$  до  $-0.7R$ , (в отличие от  $-1.4 \leq x/R \leq -1.0$  на рис. 6, а), т.е. охватывает почти 15 % площади над выемкой. Следует отметить, что область ускорения, показанная на рис. 6, а и 7, а, занимает, по сути дела, одну и ту же площадь над выемкой – порядка 85 %. При малой скорости обтекания  $U_\infty = 1.1$  м/с она смещена в носовую часть выемки (зона торможения в корме). При  $U_\infty = 10.1$  м/с зо-

на торможения, наоборот, перемещается в область отрыва пограничного слоя.

Для внешней области пограничного слоя (рис. 7, б) обнаружено снижение уровней пульсаций продольной скорости (с нарастающим темпом в кормовой части канавки). Максимум этого снижения проявляется в непосредственной близости к ударной стенке углубления  $x/R = 1.1$ . Пульсации скорости в логарифмической или инерционной области пограничного слоя при всех  $x/R$  превышают соответствующие значения для ненарушенного пограничного слоя, в отличие от режима обтекания с малой скоростью (см. рис. 6, б). В пристеночной области пульсации также возросли, за исключением области над точкой отрыва пограничного слоя, где пульсационная составляющая продольной скорости резко упала и снизилась на 25 %. В остальных исследуемых сечениях над пластиной и углублением вдоль продольной координаты прирост пульсаций скорости во внутренней области пограничного слоя оказывается наибольшим и своего максимума (45 %) достигает при  $x = 0.76R$ . Кстати, здесь же наблюдаются локальные экстремумы пульсаций продольной скорости и для остальных двух значений  $y/\delta_{-R}$ , представленных на рис. 7, б.

При дальнейшем росте скорости обтекания до 20.1 м/с (рис. 8) можно отметить повсеместное (по всей толщине пограничного слоя) торможение набегающего потока. Оно проявляется на расстоянии, превышающем радиус канавки перед ее передним краем. Над поверхностью углубления продольные осредненные скорости постепенно убывают с чередующимися характерными зонами тор-

можения и ускорения потока. Оторвавшийся пограничный слой испытывает наибольшее торможение над углублением в сечении  $x \approx 0.5R$  по всей своей толщине. Ускорение потока наблюдается в непосредственной близости к ударной стенке канавки. Затем он тормозится у кормовой стенки углубления. Для сечения  $y = 0.2\delta_{-R}$  область торможения простирается и за ударный край углубления. Позади канавки поток начинает ускоряться в основном во внутренней части пограничного слоя.

Поле пульсаций высокой продольной скорости  $U_\infty = 20.1$  м/с имеет свои особенности поведения. Уровни пульсаций скорости во внешней части пограничного слоя перед углублением возрастают (при  $U_\infty = 20.1$  м/с), а в пристеночной – сначала понижаются, а затем растут (см. рис. 8, б). Над точкой отрыва пульсации скорости по всей толщине пограничного слоя резко убывают, а затем вновь нарастают в пристеночной и логарифмической областях. Во внешней части пограничного слоя пульсации скорости уменьшаются почти до центра углубления, а потом растут по квазигармоническому закону. Нарастание пульсаций скорости в этой части пограничного слоя прослеживается и позади углубления (вплоть до  $x/R \approx 2$ ). В пристеночной и логарифмической областях пограничного слоя зоны торможения и ускорения потока находятся в одних и тех же продольных сечениях (кривые 2 и 3 на рис. 8, б). Максимум пульсаций скорости в этих областях зарегистрирован вблизи ударной стенки, а именно, при  $x = 0.75R$ . В области дальнего следа углубления пульсации продольных скоростей монотонно убывают во внутренней части пограничного слоя, приближаясь к значениям ненарушенного углублением пограничного слоя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании экспериментального изучения влияния локального углубления на пограничный слой над пластиной можно сделать следующие выводы.

1. Обнаружено, что в пограничном слое над пластиной с поперечно обтекаемым углублением наблюдаются области торможения и ускорения потока, независимо от режимов обтекания пластины с углублением (ламинарного или турбулентного).
2. Зарегистрировано убывание заполненности профилей осредненной продольной скорости при приближении к углублению. Это ука-

зывает на тормозящее воздействие локального углубления на набегающий поток.

3. Установлено, что торможение потока перед углублением наблюдается только во внутренней (пристеночной) области пограничного слоя при ламинарном обтекании. С ростом скорости обтекания тормозящее воздействие углубления распространяется на всю толщину пограничного слоя.
4. Обнаружено, что в профилях осредненной продольной скорости имеют место перегибы кривых, которые характеризуют неустойчивость пограничного слоя, присущую как ламинарному, так и турбулентному режимам обтекания пластины с выемкой. Особенно неустойчивость пограничного слоя проявляется в зоне ближнего следа углубления.
5. Пульсации продольной скорости над пластиной с углублением имеют чередующиеся зоны повышения и понижения уровня. Значения пульсационных составляющих продольной скорости возрастают во внутренней и логарифмической областях пограничного слоя с переходом к турбулентному режиму обтекания. При этом они убывают во внешней области пограничного слоя (особенно с приближением к кормовой части углубления).

1. Rockwell D. Vortex-body interactions // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1998.– **30**.– P. 199–229.
2. Babenko V. V., Musienko V. P., Korobov V. I., Ptucha Y. A. Experimental investigation of spherical groove influence on the intensification of heat and mass transfer in the boundary layer // Euromech 327: Effects of organized vortex motion on heat and mass transfer.– Kiev, Ukraine, 1994.– P. 23–24.
3. Горбань В. О., Горбань І. М. Дослідження динаміки вихрових структур в кутовій області та поблизу поверхні з заглибленням // Прикл. гідромех.– 1999.– **1**, N 1.– С. 4–11.
4. Исаев С. А., Кудинов П. И., Кудрявцев Н. А., Пышный И. А. Численный анализ струйно-вихревой картины течения в прямоугольной траншее // ИФЖ.– 2003.– **76**, N 2.– С. 24–30.
5. Jacquin L., Forestier N., Geffroy P. Small scale production in the coherent structures of a shear flow over an open cavity // Turbulence and Shear Flow Phenomena, Stockholm.– 2001.– **1**.– P. 413–418.
6. Rockwell D., Knisely C. Observations of the three-dimensional nature of unstable flow past a cavity // Phys. Fluids.– 1980.– **23**, N 3.– P. 425–431.
7. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермишина и С. А. Исаева.– М.: СПб, 2001.– 360 с.

8. Babenko V. V., Turick V. N., Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. V. Vortical structures in cross streamlined half-cylindrical cavity on a plate and interaction with boundary layer // Proc. 5th Euromech Fluid Mech. Conf. "EFMC 2003".– Toulouse, France, 2003.– P. 414.
9. Gharib M., Roshko A. The effect of flow oscillations on cavity drag // J. Fluid Mech.– 1987.– **177**.– P. 501–530.
10. Howe M. S. Edge, cavity and aperture tones at very low Mach numbers // J. Fluid Mech.– 1997.– **333**.– P. 61–84.
11. Lin J. - C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA J.– 2001.– **39**, N 6.– P. 1139–1151.
12. Sarohia V. Experimental investigation of oscillations in flows over shallow cavities // AIAA J.– 1977.– **15**, N 7.– P. 984–991.
13. Дыбан Е. П., Элик Э. Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизованных потоков.– К.: Наукова думка, 1985.– 296 с.
14. Алемасов В. Е., Глебов Г. А., Козлов А. П. Термометрические методы исследования отрывных течений.– Казань: Казанский филиал АН СССР, 1990.– 178 с.
15. Comte-Bellot G. Hot-wire anemometry // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1976.– **8**.– P. 209–231.
16. Khoo B. C., Chew Y. T., Teo C. J. On near-wall hot-wire measurements // Exp. Fluids.– 2000.– **29**, N 6.– P. 448–460.
17. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении.– Л.: Машиностроение, 1974.– 480 с.
18. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа.– М.: Наука, 1978.– 736 с.
19. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 744 с.
20. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение.– М.: Мир, 1974.– 278 с.
21. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое.– Новосибирск: Наука, 1982.– 152 с.
22. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности.– М.: Иностранная литература, 1962.– 204 с.
23. Pereira J. C. F., Sousa J. M. M. Experimental and numerical investigations in a rectangular cavity // J. Fluids Engng.– 1995.– **117**.– P. 68–74.
24. Баранов П. А., Гувернюк С. В., Зубин М. А., Исачев С. А. Численное и физическое моделирование циркуляционного течения в вихревой ячейке на стенке прямого канала // Изв. РАН. МЖГ.– 2000.– N 5.– С. 44–56.
25. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Пульсации скорости и давления на обтекаемой поверхности с локальным препятствием // Збірник праць акустичного симпозиуму "КОНСОНАНС-2003".– Київ: ІГМ НАНУ, 2003.– С. 36–42.
26. Cattafesta L., Williams D., Rowley C., Farrukh A., Review of active control of flow-induced cavity resonance // AIAA Pap. 2003-3567.– 2003.– P. 1–20.
27. Zhang X. Compressible cavity flow oscillation due to shear layer instabilities and pressure feedback // AIAA J.– 1995.– **33**, N 8.– P. 1404–1411.
28. Blake W. K. Mechanic of flow-induced sound and vibration: in 2 vols.– New York: Academic Press, 1986.– 974 p.
29. Ffowcs-Williams J. E. Hydrodynamic noise // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1969.– **1**.– P. 197–222.
30. Kegerise M. A., Cabell R. H., Cattafesta L. N., Real-time adaptive control of flow-induced cavity tones // AIAA Pap. 2004-0572.– 2004.– P. 1–13.
31. Colonius T., Basu A. J., Rowley C. W. Computation of sound generation and flow/acoustic instabilities in the flow past an open cavity // Proc. FEDSM99, 3rd ASME/JSME Engng Conf.– San Francisco, USA, N FEDSM99-7228, 1999.– P. 1–6.
32. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Макаренко А. П. Влияние локального препятствия на структуру поля пульсаций давления // Вісн. Донецьк. ун-ту, Сер. А: Природничі науки.– 2002.– **1**.– С. 170–175.
33. Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Макаренко А. П. Псевдозвук за препятствием на продольно обтекаемом цилиндре // Акуст. вісн.– 2002.– **5**, N 1.– С. 22–36.
34. Смольяков А. В. Вычисление спектров псевдозвуковых флуктуаций пристеночных давлений в турбулентных пограничных слоях // Акуст. ж.– 2000.– **46**, N 3.– С. 401–407.
35. Кудашев Е. Б. Подавление акустических шумов при измерении пристеночных пульсаций давлений // Акуст. ж.– 2003.– **49**, N 5.– С. 644–649.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ. СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$d_0$	– внутренний диаметр аэродинамической трубы;
$R$	– радиус углубления;
$Re_x$	– число Рейнольдса по длине пластины, $xU_\infty/\nu$ ;
$t$	– время;
$U$	– осредненная продольная скорость;
$U_e$	– осредненная продольная скорость перед углублением при $x = -7R$ ;
$U_\infty$	– скорость обтекания пластины с углублением;
$u'$	– пульсации продольной скорости;
$u'_e$	– пульсации продольной скорости перед углублением при $x = -7R$ ;
$x$	– продольная координата вдоль пластины;
$y$	– координата по нормали к пластине;
$z$	– поперечная координата (координата вдоль углубления);
$\delta$	– толщина пограничного слоя;
$\delta_{-R}$	– толщина пограничного слоя над передним краем углубления;
$\nu$	– кинематическая вязкость.