

УДК 532.57 532.517 536.53 533.6

## ОБТЕКАНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО И ОВАЛЬНОГО УГЛУБЛЕНИЙ

В. В. БАБЕНКО\*, В. П. МУСИЕНКО\*, В. Н. ТУРИК\*\*

\* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

\*\* Национальный технический университет Украины "КПИИ Киев

Получено 00.00.2012

Представлены новые результаты экспериментальных исследований обтекания полусферического и овального сегментных углублений одинаковой глубины и близкого по размеру продольного диаметра, имеющих закругленные края. Эксперименты проведены в замкнутой гидродинамической трубе при помощи специальных приспособлений. На различных расстояниях в окрестности и над лунками измерены профили продольной осредненной и пульсационной скорости при помощи лазерного анемометра. Обнаружены новые физические особенности вихревых структур в овальной лунке по сравнению с круглой лункой. Классифицированы характерные режимы течения вихревых структур в овальной лунке в зависимости от чисел Рейнольдса. Осредненные профили скорости построены в трех видах координат. Выделены три характерных признака формы профиля скорости при обтекании овальной лунки.

Наведені нові результати експериментальних дослідів обтікання напівсферичної та овальної сегментних заглиблень однакової глибини та близького по розміру повздовжнього діаметру, що мають закруглені краї. Експерименти проведені у замкнутій гідродинамічній трубі за допомогою спеціальних приладів. При різних відстанях навколо та над лунками зроблені виміри профілів повздовжньої осередненої та пульсаційної швидкості за допомогою лазерного анемометра. Знайдені нові фізичні особливості течії вихрових структур в овальній лунці порівняно з круглою лункою. Класифіковано характерні режими течії вихрових структур в овальній лунці в залежності від чисел Рейнольдса. Осереднені профілі швидкостей побудовані в трьох видах координат. Виділені три характерні ознаки форми профілю швидкості при обтіканні овальної лунки.

New results of experimental researches of a flow of hemispherical and oval segment deepening's of identical depth and relatives on the size of the longitudinal diameter having the rounded off edges are presented. Experiments are lead in the closed hydrodynamic tunnel by means of special adaptations. Profiles longitudinal time-averaged and pulsating speeds are measured by means of laser anemometer on various distances in vicinity and above cavities. New physical features of vortical structures in oval cavity in comparison with round cavity are found out. Characteristic flow regime of vortical structures in oval cavity depending on Reynolds's numbers is classified. Averaged profiles of speed are constructed in three kinds of coordinates. Three characteristic attributes of the form of speed profiles are allocated at a flow oval cavity.

### ВВЕДЕНИЕ

Обзор проблемы обтекания различных углублений выполнен в [1–5 и др.]. В [5] приведены новые результаты экспериментальных исследований обтекания двух сферических сегментных углублений различного диаметра и глубины, имеющих закругленные края. Эксперименты проведены в замкнутой гидродинамической трубе при помощи специальных приспособлений. На различных расстояниях в окрестности и над лунками измерены профили продольной осредненной и пульсационной скорости при помощи лазерного анемометра. Обнаружены новые физические особенности течения вихревых структур в трехмерных углублениях. Классифицированы три характерных режима течения вихревых структур в лунках в зависимости от чисел Рейнольдса. На основании анализа выполненных ранее исследований была разработана программа проведения экспериментальных исследований обтекания трехмерных углублений [4]. Для реализации этой программы в [5] были разработаны различные варианты углублений. Был выполнен анализ полученных результатов при об-

текании полусферических сегментных углублений на основании положений проблемы восприимчивости пограничным слоем различных возмущений [6]. Сделано предположение, что когерентные вихревые структуры (КВС) пограничного слоя (ПС) взаимодействуют с вихревыми структурами, возникающими в исследованных лунках при различных скоростях обтекания.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований овальной лунки ЛЗ в соответствии с классификацией работы [5]. Выполнено сравнение полученных результатов с некоторыми данными при исследовании сферической сегментной лунки Л21.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты были выполнены в Институте физико-технических проблем энергетики Литовской Академии Наук при поддержке Пядишюса А. А.

Экспериментальные исследования обтекания

трехмерных круглых лунок были выполнены в замкнутой гидродинамической трубе, устройство и фотография которой приведены в [4]. На дне рабочего участка имелся прямоугольный вырез, в котором устанавливалась гладкая пластина заподлицо с дном. В этой пластине было выполнено отверстие диаметром 0.1 м для установки круглой вставки, в которой имелось также два отверстия для установки двух втулок с исследуемыми формами лунок. Фотография вставки приведена в [4, 5]. Расстояние между осями лунок составляло 0.06 м.

Визуализация течения в лунках и их окрестности проводилась с помощью подкрашенных струек. Для этого использовались струйки подкрашенные красителем с удельным весом, сравнимым с удельным весом воды. В качестве красителей использовались метиловый фиолетовый и метиловый красный РН-индикаторы. Струйка красного цвета подавалась вдоль продольной оси рабочего участка при помощи трубки диаметром 0.8 мм, установленной перед круглой вставкой на расстоянии 20 мм. Конструкция крепления трубки позволяла варьировать высоту подачи струйки в пределах  $y = (0.2 \div 1.0)$  см и, таким образом, визуализировать картину обтекания по всей толщине ПС. Струйки фиолетового цвета подавались через три отверстия, выполненных во втулках заподлицо с пластиной и позволяли визуализировать картину течения в лунке. Диаметр этих трубочек и их взаимное расположение приведены в [4, 5]. Процесс обтекания, визуализированный подкрашенными струйками, регистрировался видеокамерой и с помощью фотоаппаратов. Методика проведения экспериментов разработана в [7] и состояла в проведении визуализации обтекания лунок в широком диапазоне скоростей:  $3 \div 75$  см/с. Вертикальные оси симметрии двух лунок при их соосном расположении находились на расстоянии 0.77 м и 0.83 м от начала рабочего участка. При исследовании одной лунки это расстояние было наибольшим. В зависимости от скорости потока числа  $Re$  зависели от дополнительного расстояния на поверхности конфузора перед рабочим участком, на котором начинал формироваться ПС. Более точное значение координаты  $x$  можно определить путем вычисления характерных толщин ПС по измеренным профилям скорости. На основании результатов визуализации определялись характерные структуры потока в районе лунки [4, 5], которые изменялись в зависимости от скорости потока. На основании анализа картин визуализации выбирались соответствующие места для проведения количественных измерений. Профили осредненных

и пульсационных скоростей измерены при помощи однокомпонентного лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), разработанного и изготовленного в Институте физико-технических проблем энергетики Литовской Академии Наук.

Было дополнительно исследовано обтекание лунки Л21, профили которой приведены в [5]. Лунка Л21 представляет собой углубление в виде сферического сегмента, как и лунка Л1 [5], и имеет соответствующие геометрические размеры: диаметр – 18 мм и глубина – 6 мм,  $h/d = 0.33$ . Лунка Л21 отличается от лунки Л1 тем, что место соединения лунки с пластиной выполнено при большом радиусе закругления. В поперечном сечении вертикальной плоскости сечения лунки сферическое кольцо сопряжения плавно сопрягается с лункой и гладкой пластиной, в которой смонтирована лунка, при этом угол стыковки кольца сопряжения с гладкой плоской поверхностью составляет  $10^\circ - 12^\circ$ . Это позволяет вихревым и волновым структурам плавно вытекать из лунок. Были исследованы кинематические характеристики потока при обтекании овальной лунки Л3, особенности изготовления которой приведено в [5]. Лунка Л3 представляет собой сегмент эллипсоида вращения с осями 28 мм (поперечная ось) и 22 мм (продольная ось). Глубина лунки Л3 составляет 6 мм. В соответствии с осями эллипса получим  $h/d = 0.286$  и 0.364.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В [4] приведены кинограммы визуализации обтекания лунки Л1 и дано подробное объяснение формирования вихревых структур в лунке на основании рассмотрения уравнений Бернулли в вертикальных продольных сечениях  $XOY$ , проведенных в лунке с шагом в трансверсальном направлении. Если рассмотреть течение вдоль продольной оси лунки, то за передним краем лунки скорость возрастает, а давление падает (эффект конфузора). Перед задним краем лунки скорость замедляется, а давление возрастает (эффект диффузора). В каждой плоскости  $XOY$ , за исключением первого сечения, проходящего через боковые края лунки, глубина кривой, являющейся линией пересечения плоскости  $XOY$  и поверхности лунки, будет увеличиваться до максимального значения в центральном сечении лунки. Если составить уравнение Бернулли в каждой плоскости  $XOY$ , то по направлению к центру лунки в каждом сечении увеличивается скорость течения, а величина давления падает. Таким образом, появляется компо-

нента скорости течения жидкости в трансверсальном направлении от боковых краев лунки к центру. Учитывая, что передняя кромка лунок криволинейная, интенсивность роста этой компоненты от передней кромки к центру лунки и интенсивность уменьшения этой компоненты от центра к задней кромке лунки будут зависеть от формы лунки и вида кривой передней и задней кромок лунки. Можно утверждать, что в симметричной лунке вследствие инерции степень изменения интенсивности будет отличаться в передней и задней половинках лунки. Это позволило обосновать также пространственную картину распределения давления внутри обтекаемой лунки. В [8] измерено распределение давления в продольном осевом сечении лунки, а в [9, 10] получена пространственная картина распределения давления внутри и в окрестности лунки. Экспериментальные результаты в основном совпадают с приведенными выше предположениями. Отличие состоит в том, что согласно [8–10] в канале давление начинает уменьшаться на плоской поверхности перед расположением лунки. Кроме того, распределение давления в лунке и за ней зависит не только от параметров лунки, но и от скорости основного потока. Эти закономерности пространственного распределения давления в лунке, как показано в [4, 5] приводят к формированию различных типов вихрей в лунке в зависимости от скорости основного потока.

В [5] приведены результаты визуализации обтекания лунки Л21 и профили осредненных и пульсационных скоростей при различных значениях скорости основного потока. Измерения выполнены при  $U_m = 9.8; 11.4; 12.8; 51.6; 76$  см/с. Отсчет координаты  $x$  начинался на расстоянии 3 мм перед краем вставки. В этом месте выполнено первое измерение: 1 –  $x=0$  мм (сечение 1), а остальные измерения выполнены для сечения 2 –  $x = 20$  мм (передний край лунки), для сечения 3 – 29 мм (центр лунки), для сечения 4 – 33 мм, для сечения 5 – 38 мм (задний край лунки), для сечения 6 – 53 мм (ось симметрии вставки).

В [5] выполнен анализ кинематических характеристик потока при взаимодействии вихревых структур, развивающихся в ПС перед лункой, с вихревыми структурами, генерируемыми лункой. О характере и виде этих вихревых структур можно судить по картинам визуализации. Ввиду большого массива данных профили осредненных и пульсационных скоростей, измеренные в вертикальных сечениях при различных координатах  $x$ , в [5] приведены в плоскости одного рисунка при одном и том же начале координат для каждого профи-

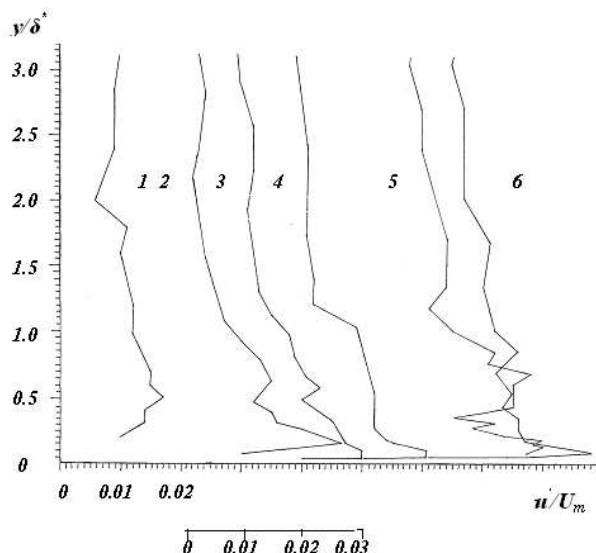


Рис. 1. Пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при  $U_m = 9.8$  см/с

ля. Это удобно для сопоставления динамики изменения формы профилей скорости во взаимосвязи с картинками визуализации структуры течения в лунке. Однако при таком представлении профилей пульсационных скоростей подробный анализ выполнить затруднительно. Поэтому на рис. 1 – 3 приведены пульсационные профили скорости при обтекании лунки Л21, когда каждый профиль скорости, измеренный при указанных координатах  $x$ , имеет свое начало координат. Цифры в плоскости рис. 1 соответствуют приведенным выше значениям координаты  $x$ . Профили скорости построены при помощи соединения прямыми линиями точек измерений по координате  $y$ . При этом не применялись методы осреднения кривой профиля скорости.

При обтекании лунки при малой скорости основного потока фотографирование картины визуализации сбоку показало, что визуализационная струйка, вытекающая из передней трубки, расположенной перед вставкой, начинает искривляться и в районе за передним краем лунки подниматься вверх над горизонтальной поверхностью вставки в результате повышения давления внутри лунки за ее передним краем. По мере приближения к заднему краю лунки эта визуализационная струйка опускается и перед передним краем лунки располагается ниже поверхности вставки. В то же время визуализационные струйки, вытекающие в лунке по ее боковым краям, движутся вдоль поверхности лунки, изгибаясь внутри лунки навстречу друг другу, как показано в [4].

Форма профиля пульсационной скорости *1* (рис. 1) практически такая же, как у профиля пульсационной скорости при обтекании гладкой плоской пластины на первых двух этапах перехода [11–15]. Измерения над лункой Л21 (рис. 1, кривые *2–4*) свидетельствуют о быстром чередовании этапов перехода и соответствуют третьему и четвертому этапам перехода в ПС плоской пластины [11, 12, 14]. В результате на заднем краю лунки Л21 сформировался пятый этап перехода: форма пульсационного профиля *5* имеет такой же характер, как и на пятом этапе перехода при обтекании плоской пластины [11, 12, 14]. Форма профиля *5* обусловлена распределением давления вблизи заднего края лунки и соответствует турбулентному ПС [11, 12, 14], несмотря на малую скорость основного потока. Форма профилей *3, 4* в районе их максимальных значений показывает, что в результате падения давления до середины лунки максимальные значения расположены ниже горизонтальной плоскости в районе лунки. В районе кривых *4, 5* в форме профилей появляется выпуклость выше их максимальных значений, что вызвано увеличением давления во второй половине лунки в месте перед задним краем лунки. Измеренное распределение давления вдоль лунки [8] показывает, что давление повышается во второй половине лунки, принимая максимальное значение в районе заднего края лунки. Но после лунки давление падает постепенно. Это приводит к тому, что вихревые структуры приводят к выбросу жидкости из лунки попеременно с различных сторон лунки, а не вдоль ее продольной оси. Поэтому форма кривой *6*, характеризующая развитие течения за лункой вдоль плоской поверхности вставки, не имеет явно выраженного максимума и обусловлена появлением трансверсальной компоненты.

На рис. 2 приведены пульсационные профили скорости при  $U_m = 11.4$  см/с. Увеличение скорости обтекания лунки привело к формированию перед лункой (кривая *1*) профиля пульсационной скорости, соответствующего шестому (предтурбулентному) этапу перехода в соответствии с классификацией работ [11, 12, 14, 15]. Кривые *2–5* (измерения над лункой) соответствуют турбулентному ПС. В силу тех же причин, как и у течения с меньшей скоростью (рис. 1) линии тока вдоль продольной оси лунки в районе передней кромки поднимаются выше горизонтальной плоскости вставки, а затем опускаются ниже этой плоскости. С ростом скорости основного потока у кривых *3–5* максимальные значения расположены ниже горизонтальной поверхности вставки. В отличие от

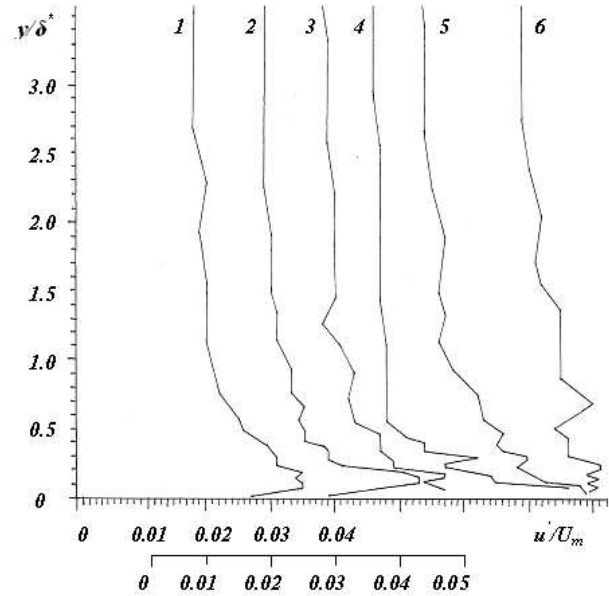


Рис. 2. Пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при  $U_m = 11.4$  см/с

кривых на рис. 1, у кривых *4, 5* рис. 2 нет выпуклостей в форме профиля. Кривая *6* (течение за лункой) соответствует распределению давления перед задним краем лунки и за ним, а ее форма такая, как и кривой *6* рис. 1. Течение в лунке Л21 подобно течению, зафиксированному видеокamerой и приведенному в [4]. Видеосъемка позволила обнаружить два веретенообразных вихря, вращающихся в лунке вдоль боковых сторон навстречу друг другу так, что вдоль продольной оси лунки течение направлено против основного потока. При этой скорости у лунки Л21 не зафиксировано отеснение потока над лункой.

На рис. 3 приведены пульсационные профили продольной скорости при  $U_m = 12.8$  см/с. Осредненные профили скорости не изменили свой характер с увеличением скорости обтекания лунки Л21 [5]. Пульсационные профили скорости при этом существенно изменились: отсутствуют характерные максимумы вблизи нулевой координаты, появляется ряд максимумов по толщине ПС над лункой до  $y/\delta^* = 0.4$  (кривая *1*), до  $y/\delta^* = 0.7$  (кривые *2, 5*), до  $y/\delta^* = 0.8$  (кривая *4*) и до  $y/\delta^* = 1.0$  (кривая *3*). При этом не наблюдается явно выраженных максимумов, а по толщине ПС зафиксировано несколько максимумов. Верхняя граница этих максимумов постепенно нарастает до середины лунки, а затем уменьшается. Характерно то, что, как и при измерениях распределения давления, вдоль лунки обнаружено вли-

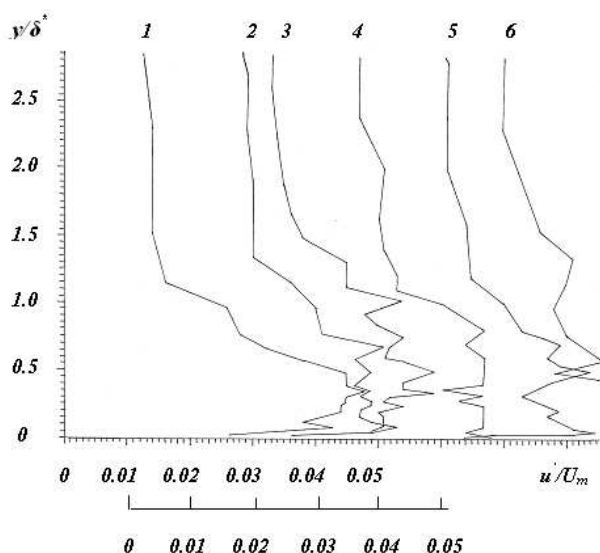


Рис. 3. Пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при  $U_m = 12.8$  см/с

яние вихревых структур, формирующихся в лунке, как вверх по потоку, так и за лункой. Характер пульсационных кривых необходимо связывать с распределением пульсаций вихревых структурах внутри лунки. Все кривые на рис. 3 свидетельствуют, что над лункой происходят интенсивные взаимодействия вихревых структур в ПС перед лункой с вихревыми структурами, генерируемыми в лунке. Формы профилей отличаются от известных пульсационных профилей скорости при обтекании жесткой пластины. Область максимальных значений пульсационных скоростей существенно растянут по вертикальной координате.

Особенности таких взаимодействий вихревых структур при обтекании лунок можно изучить по результатам изменения толщины вытеснения  $\delta^*$  вдоль лунки при различных скоростях основного потока. На рис. 4 приведены такие закономерности. Первое измерение (сечение 1) на рис. 4 выполнено при  $x=0$  мм (3 мм до края вставки), второе – при  $x=20$  мм (передний край лунки), третье – при  $x=29$  мм (центр лунки), четвертое – при  $x=33$  мм (примерно три четверти лунки), пятое – при  $x=38$  мм (задний край лунки), шестое – при  $x=62$  мм для кривой 1 (за лункой на вставке за осью симметрии вставки), при  $x=64$  мм для кривой 2, при  $x=60$  мм для кривой 3 и при  $x=64$  мм для кривой 4. Эти места измерений соответствуют точкам излома кривых на рис. 4. Наибольшие величины толщины вытеснения зафиксированы при  $U_m = 9.8$  см/с (кривая 1). Величина  $\delta^*$  возрастает до расположения лунки и постепенно уменьшается

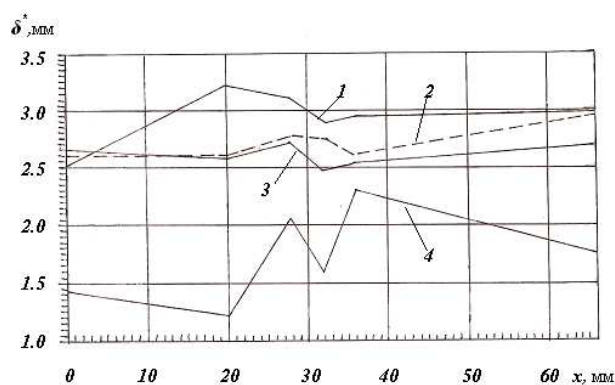


Рис. 4. Распределение толщины вытеснения профилей скорости в окрестности лунки Л21 при скорости основного потока:  
1 –  $U_m = 9.8$  см/с, 2 – 11.4 см/с, 3 – 12.8 см/с, 4 – 52.5 см/с

вдоль лунки в районе, где скорость возрастает, а давление уменьшается. Перед задним краем лунки  $\delta^*$  начинает постепенно нарастать. При скорости  $U_m = 11.4$  см/с (кривая 2) величины  $\delta^*$  уменьшаются. Закономерность изменения величины  $\delta^*$  изменяется по сравнению с кривой 1.

Так, на пластине до лунки  $\delta^*$  остается примерно одинаковой, а затем, начиная с переднего края лунки и до ее середины, незначительно возрастает. Перед задним краем лунки величина  $\delta^*$  уменьшается, а за задним краем лунки плавно возрастает. При большей скорости  $U_m = 12.8$  см/с (кривая 3) до середины лунки закономерность изменения  $\delta^*$  такая же, как и у кривой 2, затем величины  $\delta^*$  изменяется также, как и у кривой 1. Такие закономерности коррелируют с соответствующими кривыми профилей пульсационной скорости, особенно с кривой 3 на рис. 4. При скорости  $U_m = 52.5$  см/с (кривая 4) величина  $\delta^*$  существенно уменьшается вдоль лунки в соответствии с увеличением скорости. До конца лунки распределение  $\delta^*$  такое же, как у кривой 3. За задним краем лунки  $\delta^*$  уменьшается и почти достигает значения  $\delta^*$  до лунки, в то время, как у кривой 3 закономерность изменения  $\delta^*$  постепенно возрастает. Распределение толщины вытеснения вдоль лунки отражает особенности картины течения внутри лунки и характер формирующихся в ней вихрей. Можно констатировать, что наблюдаются два режима формирования вихрей в лунке: при малой скорости распределение величины  $\delta^*$  существенно отличается от распределения  $\delta^*$  при остальных скоростях основного потока. Полученные картины визуализации потока в лунке [4, 5] соответствуют такому выводу. Результаты измерений распределения величин

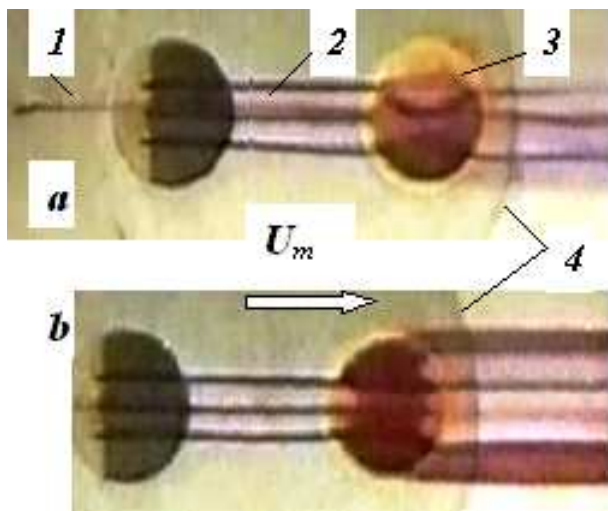


Рис. 5. Формирование вихревых структур в лунке Л18 при  $U_m = 3.5$  см/с (а) и  $U_m = 4.4$  см/с (б): 1 – визуализационная струйка, вытекающая из трубки, расположенной в пограничном слое перед вставкой; 2 – визуализационные струйки, вытекающие из пластины перед лункой; 3 – вихревые структуры, формирующиеся в Л18; 4 – контуры круглой вставки

ны  $\delta^*$  вдоль лунки коррелируют с распределением давления в районе расположения лунки.

На рис. 5 – 7 приведены картины визуализации обтекания лунок различной формы при различных скоростях основного потока. На рис. 5 с помощью видеокамеры зафиксировано формирование вихрей в лунке Л18 [4], представляющей собой сегмент сферической лунки с размерами  $h = 5$  мм и  $d = 20$  мм ( $h/d=0.25$ ). Скорость обтекания составляла  $U_m = 3.5$  см/с (рис. 5 а). Фотографирование с помощью кинокамеры проводилось под некоторым углом, поэтому сферическая сегментная лунка на рис. 5 выглядит как овальная поперечная лунка.

На рис. 5 а внутри лунки Л18 формируются продольные Х-образные контуры течений, направленных от задней кромки лунки против потока. Кинограмма, приведенная в [4], зафиксировала постепенное движение струйки от задней кромки лунки до передней кромки в районе продольной оси лунки, и затем движение струйки по потоку вдоль боковых стенок лунки. В районе задней кромке течения в лунке по бокам продольной оси разделяются: частично поток в лунке снова возвращается назад к передней кромке, а частично вытекает из лунки. Таким образом, в лунке формируется пара продольных веретенообразных вихрей. За лункой ширина потока, вытекающая из лунки примерно равна расстоянию между край-

ними отверстиями для визуализации струек 2. Трубочка для инъекции визуализационной струйки 1 располагалась перед лункой на расстоянии 5 мм от поверхности рабочего участка. Видно, что струйка 1, инжектируемая из этой трубочки, равномерная при течении до лунки, а за лункой формируется продольное вихревое движение. На рис. 5 б скорость основного потока возросла –  $U_m = 4.4$  см/с. Соответствующие числа Рейнольдса составили  $Re_d = 8.7 \cdot 10^2$ ,  $Re_x = 4.28 \cdot 10^4$ . Видно, что интенсивность пары продольных периферийных веретенообразных вихрей в лунке Л18 увеличилась. Одновременно между этой парой вихрей формируется менее интенсивный поперечный вихрь. Это приводит к тому, что теперь жидкость вытекает из лунки в виде пары двух продольных вихрей, расположенных в районе боковых сторон лунки. Ближе к продольной оси лунки эти пары продольных вихрей формируются за счет жидкости, вытекающей из продольных веретенообразных вихрей и поперечного вихря в лунке, а ближе к боковым сторонам лунки – в основном из продольных веретенообразных вихрей. Расстояние между осями этих продольных вихрей, вытекающих из лунки,  $\lambda_z \leq d$ , но ширина захвата жидкости этими вихрями превышает диаметр лунки. Характерно, что возросшая интенсивность пары продольных периферийных веретенообразных вихрей и возникшего между ними поперечного вихря привела к росту по вертикали области потока, на который они оказывают влияние. Поэтому на рис. 5 б визуализационная струйка 1, расположенная выше обтекаемой поверхности, достигает заднего края лунки, на котором частично захватывается поперечным вихрем, а частично вытекает за лунку. Следует отметить, что струйка 1 располагается над поверхностью рабочего участка на расстоянии, равном глубине лунки. Характер пульсационных скоростей, особенно на рис. 3, свидетельствует об увеличении влияния вихревых структур на основной поток над лункой по координате  $y$ . Форма указанных вихревых структур, возникающих в лунках в зависимости от скорости основного потока, определяется пространственным распределением давления в лунке и ее окрестности.

На рис. 6 приведены фотографии обтекания овальной лунки Л3. Геометрические параметры составили 28 мм (поперечная ось) и 22 мм (продольная ось), а глубина – 6 мм ( $h/d=0.286$  и  $0.364$ ). Овальная лунка Л3 имела малый радиус закругления кромок по сравнению с лункой Л18 (рис. 5). Скорость основного потока при обтекании овальной лунки Л3 ( $U_m \leq 2$  см/с) была меньше, чем при

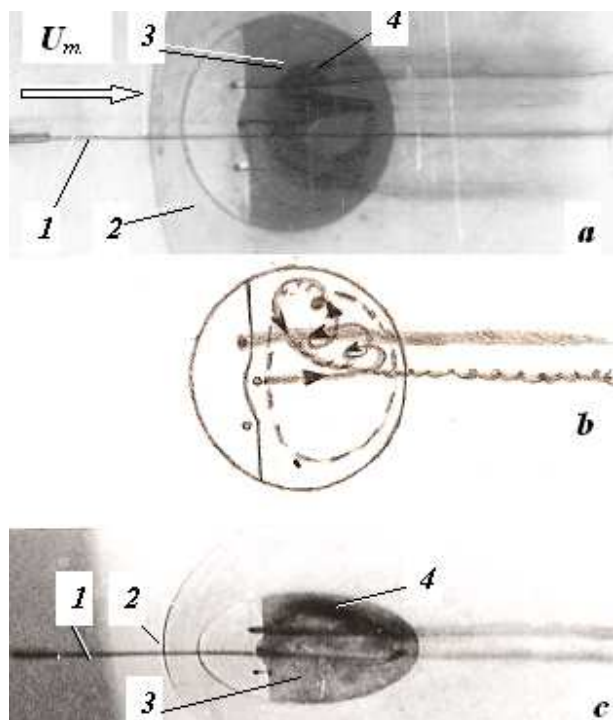


Рис. 6. Структура течения в лунке Л3 при  $U_m \leq 2$  см/с:

1 – визуализационная струйка, вытекающая из трубки, расположенной в ПС перед вставкой; 2 – круглая вставка; 3 – овальная лунка Л3; 4 – вихревые структуры, формирующиеся в лунке; а – фотографирование сверху, б – направление течения в лунке по визуальному наблюдению; с – фотографирование сбоку под углом

обтекания круглой лунки Л18. Три визуализационные струйки вытекали из отверстий во вставке на различных расстояниях от лунок: на рис. 5 струйки достигали лунки Л18 только через 60 мм, а на рис. 6 струйки вытекали сразу перед лункой Л3. На рис. 6 а видно, как за передней кромкой лунки формируется поперечный вихрь, вытекающий по бокам лунки Л3. При этом поперечное расстояние вытекающих структур больше, чем у круглой лунки Л18, но меньше поперечного размера овальной лунки. В то же время у круглой лунки центральная визуализационная струйка поглощается периферийными сторонами поперечного вихря. На рис. 6 б дана картина течения центральной визуализационной струйки, которая частично возвращается и течет против потока по боковой поверхности лунки, а частично вливается в поперечный вихрь и вытекает из лунки. Такая картина подобна особенностям обтекания круглой лунки (рис. 5 а).

Отличие состоит в том, что в круглой лунке обратное течение идет вдоль продольной оси лун-

ки, а у овальной лунки – вдоль боковой поверхности лунки. Вероятно, при обтекании овальной лунки изменяется распределение давления в лунке. На рис. 6 с приведена фотография овальной лунки Л3, сделанная фотоаппаратом под углом к горизонтальной плоскости. Поэтому овальная лунка Л3, расположенная поперек потока (с продольной короткой осью), выглядит как овальная продольная лунка. На рис. 6 с из правого отверстия в стенке почти не вытекает визуализационная струйка. В то же время хорошо видна вытекающая визуализационная струйка из левого отверстия в стенке. Она вытекает из лунки в виде продольного вихря. Визуализационная струйка, вытекающая из среднего отверстия в стенке, достигая заднего края лунки, частично вытекает из лунки, а частично поворачивает назад налево и движется против потока вдоль боковой поверхности лунки, как это показано на рис. 6 б. У передней кромки лунки Л3 эта струйка частично втягивается в поперечный вихрь, показанный на рис. 6 а, частично поглощается левой визуализационной стружкой, а частично совпадает с вытекающей центральной стружкой и вытекает из лунки вдоль продольной оси. Визуализационная струйка 1, вытекающая из трубки, расположенной вдоль продольной оси над вставкой, начинает опускаться к стенке до лунки. Эта струйка в районе переднего края лунки под влиянием вращающегося поперечного вихря (рис. 6 а) частично поглощается этим вихрем, опускается ниже плоскости вставки, частично затормаживается перед задним краем лунки (на рис. 6 с видно темное пятно) и направляется вправо вдоль передней поверхности лунки, и частично вытекает из лунки. При увеличении скорости  $U_m$  указанные особенности формирования вихревых структур в овальной лунке ускоряются.

На рис. 7 приведена фотография формирования вихревых структур в лунке Л3 при увеличении скорости потока в 3 раза по сравнению с рис. 6 ( $U_m = 5.9$  см/с). Для анализа структуры течения в лунках следует учесть, что сплошной цвет визуализационных струек свидетельствует о минимальных деформациях потока. Степень размытости струйки свидетельствует о формировании и интенсивности вихрей, вследствие чего происходит размывание красящего вещества струйки. Поэтому все струйки, поступающие в лунку Л3, имеют сплошной цвет. После заглуждения в лунку крайние струйки разделяются как бы на две струйки. Это свидетельствует, что струйки закручиваются в продольном направлении. Вблизи заднего края лунки струйки частично поворачивают назад и движутся против потока под действием уменьше-

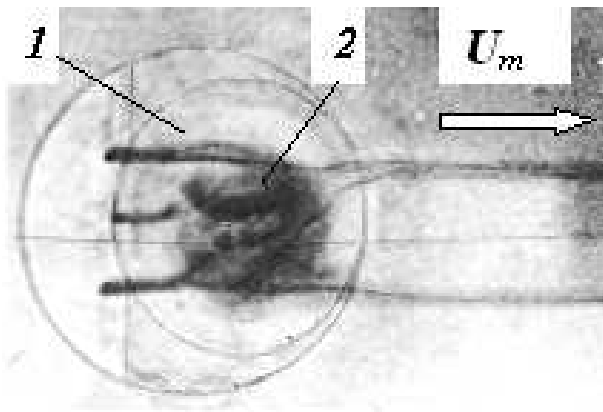


Рис. 7. Структура течения в овальной лунке Л3 при  $U_m = 5.9$  см/с: 1 – лунка Л3, 2 – вихревые структуры, формирующиеся в лунке

ния давления к центру лунки и возрастания давления перед задним краем лунки. При этом формируется пара веретенообразных продольных вихревых областей, как и на рис. 5. Продольная ось этих вихрей направлена вдоль потока, а поперечная ось симметрии – перпендикулярно к образующей лунки. Поток, визуализируемый средней красящей струйкой, размывается и захватывается указанными эллиптическими вихрями. Хорошо видно, что в веретенообразном вихре вращение происходит по спирали. При прохождении крайними струйками области закругления лунки течение разделяется: часть потока возвращается в лунку и формирует пару веретенообразных вихрей, а часть потока, расположенного на уровне плоской пластины, движется за лунку. Частично поток в осевой области лунки вытекает из лунки и присоединяется к визуализационным периферическим струйкам, которые по степени размытости и областям сгущения краски свидетельствуют, что за лункой формируется пара продольных вихрей. При обтекании овальной лунки формируется два типа вихревых структур в лунке, зависящих от скорости основного потока подобно случаю обтекания круглой лунки (рис. 5, 6).

В [13] приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия трехмерных возмущений, возникающих при обтекании различных видов генераторов вихрей, установленных на пластине, с когерентными вихревыми структурами (КВС), возникающими в ПС на различных этапах перехода [4]. Показано, что при определенных условиях происходит взаимодействие естественных вихревых структур ПС с возмущениями, вносимыми в ПС при помощи генераторов вихрей. Такое взаимодействие наблюдается за генерато-

рами вихрей. При обтекании лунок происходит более сложная картина взаимодействия возмущений. Сформированные вихревые структуры в ПС перед лункой могут оказывать влияние на характер течения в лунке. Это приводит, в частности, к видоизменению формирования типов вихрей в лунке. Поэтому вихревые системы ПС взаимодействуют с видоизмененными вихревыми структурами в лунке и, в дальнейшем, начинают взаимодействовать с формирующимися вихревыми структурами за лункой.

Были измерены продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки Л3 при различных величинах скорости основного потока. Геометрические параметры лунки Л3 приведены выше. Начало координаты  $x$  располагалось на краю вставки. Первое измерение выполнено в сечении 1 при  $x=5$  мм (край втулки), второе (сечение 2) – при  $x=13$  мм (передний край лунки), третье (сечение 3) – при  $x=24$  мм (центр лунки), четвертое (сечение 4) – при  $x=30$  мм, пятое (сечение 5) – при  $x=35$  мм (задний край лунки), шестое измерение (сечение 6) – при  $x=40$  мм. На рис. 8 приведены профили продольной осредненной скорости при  $U_m = 15.01$  см/с (кривые 2), при 14.7 см/с (кривая 3), при 14.58 см/с (кривая 4), при 14.47 см/с (кривая 5) и при 14.9 см/с (кривая 6), а на рис.9 при  $U_m = 14.58$  см/с (кривые 1), при 14.36 см/с (кривые 2), при 15.34 см/с (кривая 3), при 15.23 см/с (кривая 4), при 15.12 см/с (кривая 5), при 15.34 см/с (кривая 6) и при 14.5 см/с (кривая 7). Процесс измерения скорости в каждой серии измерений занимает время, в течение которого скорость осредненного потока незначительно меняется. Поэтому указывается средняя скорость в период проведения измерений при каждой указанной выше координате  $x$ .

Сравнение формы профилей скорости, измеренных в этих сериях, позволит определить зависимость формы профиля, как от величины основной скорости, так и условий проведения измерений. В сериях  $a$  и  $b$  измерения выполнены примерно при одинаковых значениях основной скорости потока. В обоих случаях профиль скорости, измеренный перед лункой, стремится на стенке к нулю, а выше по толщине ПС в профиле зафиксирован перегиб, вызванный тем, что распределение давления в лунке влияет на давление перед лункой и за ней. Отличие формы профилей скорости при обтекании овальной лунки Л3 от круглых лунок Л20 и Л21 обусловлено тем, что в первом и последнем сечениях измерения производятся вблизи от края лунок, в то время как у лунок Л20 и Л21 подобные измерения проводились существенно даль-



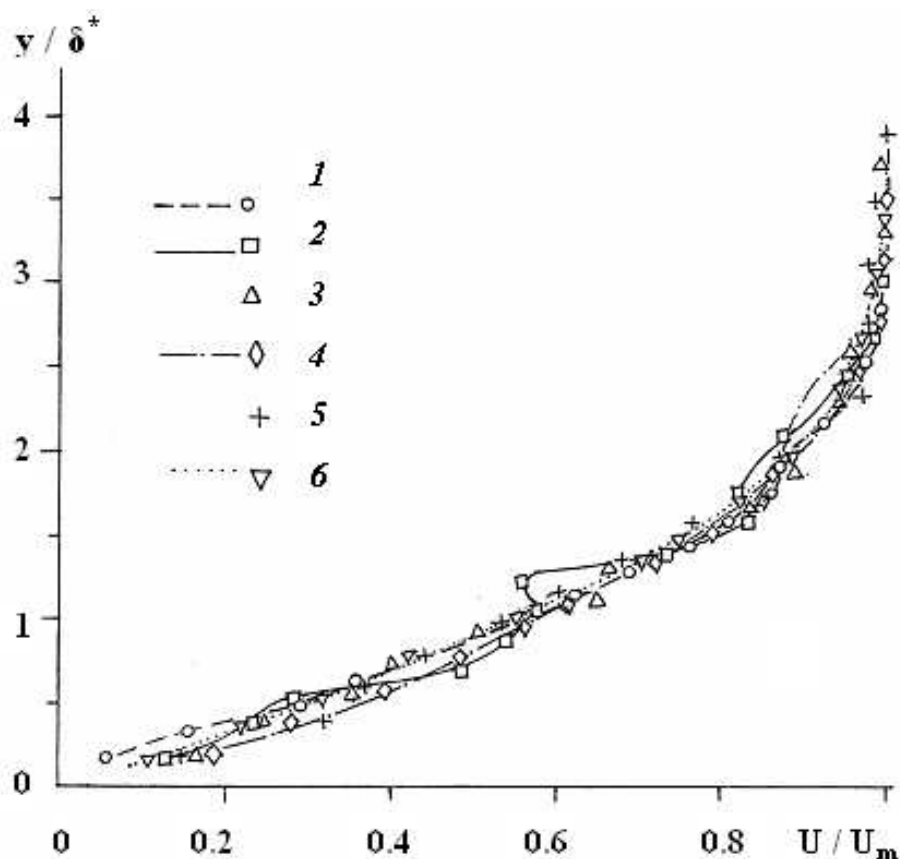


Рис. 8. Продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ при  $U_m = 14, 5 - 15$  см/с). Цифрами обозначены координаты  $x$  места измерения (см. в тексте)

ше от края лунок. Остальные профили скорости, измеренные в районе лунки ЛЗ, не стремятся к нулю в начале координат. Это объясняется возвратными течениями внутри лунки, как показано на рис. 5–7. Измерение профилей скорости в 6 сечении за лункой показали форму профиля, характерную при выбросе жидкости из лунки.

При увеличении скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ при  $U_m = 19$  см/с, 22 см/с, 27 см/с и 35 см/с отмечены характерные особенности формы профилей скорости в окрестности лунки сохраняются. Однако при этом уменьшается деформация формы профилей по толщине ПС. Приведенные на рис. 8, 9 осредненные формы профилей скорости менее информативны по сравнению с пульсационными профилями скорости.

На рис. 10 измеренные профили скорости приведены в логарифмических координатах, как было предложено в [16]. Это дает возможность более детально изучить поведение жидкости вблизи стенки. Известно много способов определения динамической скорости вблизи обтекаемой поверхности.

Наиболее простой из них – определять динамическую скорость по градиенту скорости вблизи стенки:

$$u_+ = \sqrt{\nu(du/dy)_w}.$$

Однако применение этого метода сопряжено, как правило, с большими погрешностями. По данным рис. 10 можно с достаточной точностью вычислить  $u_+$ . На рис. 10, 11 кривыми 2, 3 приведены результаты измерения профилей скорости при обтекании жесткой пластины в аэродинамической трубе в зависимости от скорости основного потока [14, 15]. Вертикальными линиями обозначен разброс экспериментальных точек. Полученные профили хорошо согласуются с данными [16], полученными в аэродинамической трубе.

Кривые 1, 2 характеризуют течение в пристеночной области турбулентного пограничного слоя и имеют одинаковый наклон. Различие кривых обусловлено числами Рейнольдса и особенно степенью турбулентности основного потока. Кривая 3 соответствует большему числу Рейнольдса и меньшей толщине вязкого подслоя, а также имеет дру-

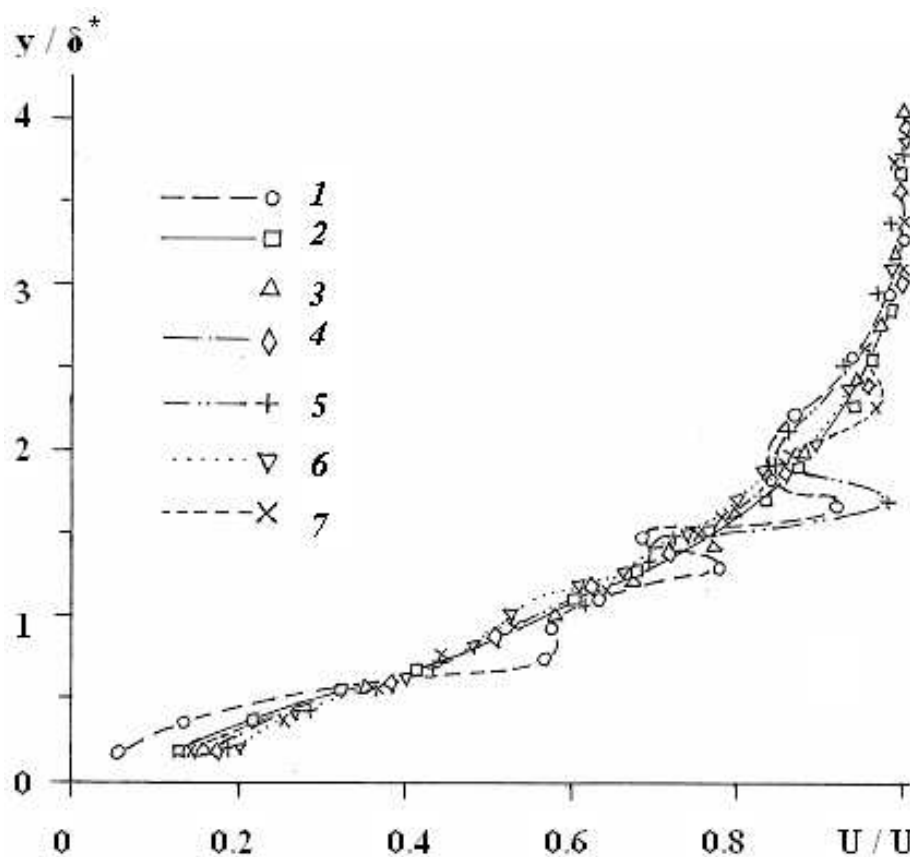


Рис. 9. Продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ при  $U_m = 14.3 - 15.3$  см/с

гой наклон в пристеночной области по сравнению с кривой 2. Таким образом, профили скорости в логарифмических координатах позволяют определить толщину вязкого подслоя и характерный наклон профиля в пристеночной области. Роль этого наклона и метрологический вид формы профиля оценены кривыми 4–10. Кривыми 5–8 обозначены результаты измерений профилей скорости при обтекании жесткой пластины при исследовании на гидродинамическом стенде на различных этапах перехода при  $U_m = 10; 18; 27; 60$  см/с и при  $\varepsilon \geq 1\%$  [12]. Кривой 9 обозначен профиль скорости Блазиуса [7] при  $U_m = 8 - 15$  см/с и  $\varepsilon \leq 0.05\%$  при обтекании жесткой и эластичных пластин. Кривая 10 – то же, что и кривая 9, но при подогреве мембранной поверхности. Более детальная характеристика профилей скорости приведена в [14, 15, 17]. При обтекании овальной лунки ЛЗ на рис. 10, 11 профили скорости, измеренные при соответствующих координатах  $x$  (см. рис. 8, 9), обозначены символами в сечении 1 – пустой ромб, 2 – пустой квадрат, 3 – пустой треугольник, 4 –

крест, 5 –  $\times$ , 6 – пустой круг. Сплошным ромбом обозначен профиль скорости в первом сечении при  $U_m = 15$  см/с. В [13] приведены характеристики КВС на каждом этапе перехода и соответствующие им скорости потока и числа Рейнольдса. Анализ приведенных на рис. 10, 11 результатов показывает, что в указанном диапазоне скоростей все профили скорости хоть и располагаются вблизи профиля Блазиуса, но по форме отличаются от профиля Блазиуса в зависимости от координаты  $x$ . При измерении профилей скорости при  $U_m = 15$  см/с (рис. 10 а) в первом сечении до лунки (ромбы) форма профиля совпадает с профилем Блазиуса до  $y/\delta = 0.2$ , а выше, начиная с  $y/\delta = 0.3$ , профиль скорости становится наполненным и подобным профилям скорости на последующих этапах перехода. В районе до  $y/\delta = 0.5$  касательная к кривой профиля становится эквидистанта кривой 2, характерной для формы профиля в вязком подслое турбулентного ПС. Во втором сечении (на переднем краю лунки) выше  $y/\delta = 0.2$  профиль скорости макси-

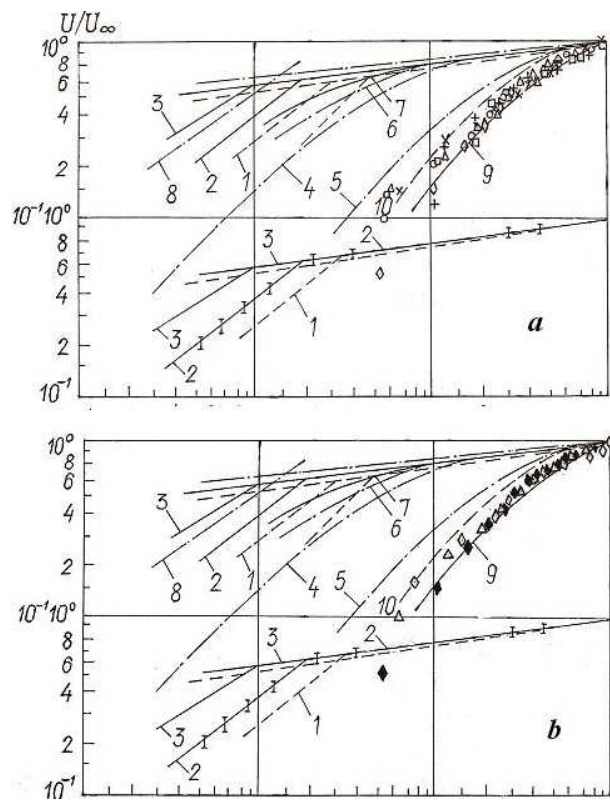


Рис. 10. Профили продольной осредненной скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ. Обтекание жесткой и эластичных пластин: кривые 1, 4 – данные работы [17] для турбулентного и переходного ПС; 2, 3 – измерения при малых и больших скоростях потока в аэродинамической трубе [14, 15], 5 – 8 измерение на гидростенде на различных этапах перехода [7] при  $\varepsilon \geq 1\%$ , 9 – то же, что и 5 – 8, но при  $\varepsilon \leq 0.05\%$  на жесткой и эластичных пластинах, 10 – то же, что и 9, но при подогреве мембранной поверхности. Обтекание овальной лунки ЛЗ (обозначение символами см. в тексте): а –  $U_m = 15$  см/с, б –  $U_m = 22$  см/с

мально отклоняется от профиля Блазиуса, а при  $y/\delta = 0.4$  сливается с профилем Блазиуса. В 3–6 сечениях (при течении над лункой) профиль скорости отклоняется от блазиусовского профиля до  $y/\delta = 0.8$ . Перегибы в профиле в этом районе свидетельствуют о формировании в лунке вихревых структур. На рис. 10 б при увеличении скорости ( $U_m = 22$  см/с) в 1 и 3 сечениях до  $y/\delta = 0.2$  зафиксированы перегибы формы профиля скорости, а выше по толщине ПС профили скорости становятся подобными профилю скорости в первом сечении на рис. 10 а (сплошные ромбы). На рис. 11 с при  $U_m = 27$  см/с наблюдается такая же картина во всех сечениях измерения профиля скорости. На рис. 11 д при  $U_m = 35$  см/с в 1 и 4 сечениях профили скорости такие же, как и на рис. 10 а в

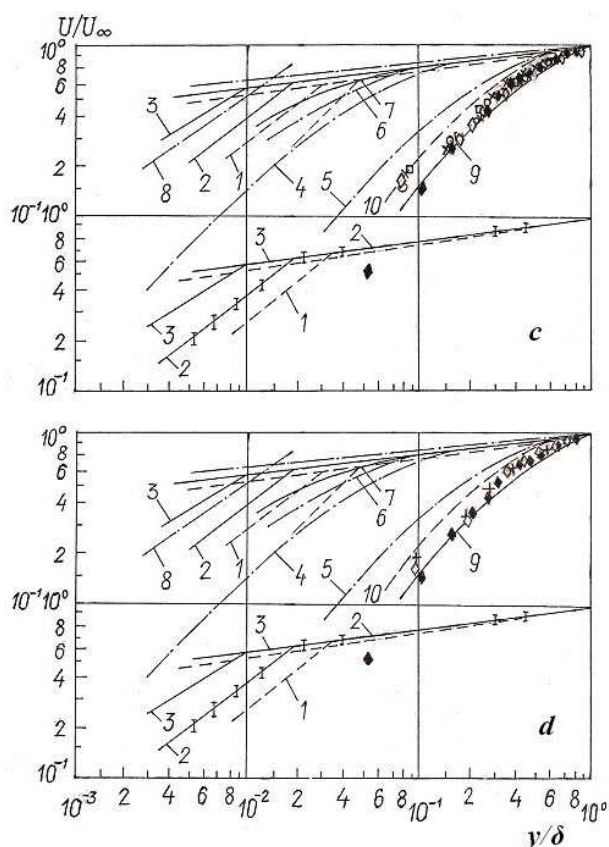


Рис. 11. Распределение продольной осредненной скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ: с –  $U_m = 27$  см/с, д –  $U_m = 35$  см/с

первом сечении. Таким образом, приведенные на рис. 10, 11 профили скорости согласуются с данными рис. 8, 9, но более информативные.

В настоящее время профили скорости для турбулентного ПС строят преимущественно в универсальных координатах. При экспериментальных исследованиях течения растворов полимеров профили скорости были также построены в универсальных координатах [18–20]. В [18] измерения проводились в трубе диаметром 3.5 см, а в [19, 20] – в прямоугольном канале сечением 1 × 1 см в замкнутых контурах и в установке с напорной емкостью. При течении воды профили скорости имели классический характер турбулентного ПС. При исследовании растворов полимеров в установке с напорной емкостью профили скорости во всем диапазоне скоростей имели ламинарную форму профиля. При исследовании в замкнутом контуре в зависимости от времени циркуляции раствора происходила деградация полимеров, и профили скорости имели форму промежуточную между турбулентным и ламинарным профилями.

В [21] приведены профили скорости в универсальных координатах при различных значениях отрицательного градиента давления (см. также в [12]). В зависимости от величины коэффициента отрицательного градиента давления кривые профилей скорости располагались выше кривой ламинарной области турбулентного пограничного слоя и выше линии турбулентного ядра.

В [12] приведены профили скорости в универсальных координатах при исследовании восприимчивости ПС к трехмерным возмущениям. Исследования выполнены в гидродинамическом стенде регулируемой турбулентности при повышенной степени турбулентности ( $\varepsilon \geq 1\%$ ) [7]. Конструкция гидродинамического стенда, устройства приспособлений и методика проведения измерений даны в [7, 12, 14, 15]. Длина рабочего участка составляла 3 м, а ширина – 0.25 м. При  $x=0.65$  м и  $U_m = 9.3; 15$  см/с (ламинарный пограничный слой) измеренные профили скорости имеют такую же ламинарную форму, как и при исследовании растворов полимеров по всей толщине ПС [18–20]. Только на внешней границе ПС под влиянием повышенной турбулентности основного потока профиль скорости изменялся и имел наклон подобный наклону прямой в турбулентном ядре ПС. Исследование восприимчивости проводилось при  $x=2.43$  м и  $U_m = 10$  см/с. При этом в ПС вносились продольные вихревые системы при помощи больших генераторов вихрей ГВЗ, у которых высота составила  $h = 7$  мм и длина  $b = 18$  мм [13]. Расстояние между ГВЗ (длина волны в трансверсальном направлении) составила  $\lambda_z = 12$  мм. Профили скорости измерялись при  $\lambda_z=0, \lambda_z/2$  и  $\lambda_z/3$ . Внесение трехмерных возмущений изменяет профили скорости таким образом, что профили соответствуют последующим этапам перехода [13], несмотря на то, что скорость потока при этом соответствовала первому этапу перехода ( $U_m = 10$  см/с). Форма профилей скорости при исследовании восприимчивости зависят от координаты  $z$  места измерения относительно ГВЗ. Формы профилей имели сходство с кривыми при исследовании влияния градиента давления на форму профиля [21]. Такие формы профиля могут быть эталонными при определении КВС в ПС.

Были исследованы также закономерности профилей скорости при обтекании различных эластичных пластин [6, 7, 11, 12, 14, 15]. Под действием основного потока в эластичных пластинах возникают колебания, которые взаимодействуют с возмущениями ПС. В [12, 15, 22] приведены результаты измерения профилей осредненной скорости при различных вариантах нагревания эла-

стичной пластины. Вставка с размещенной на ней эластичной пластиной размещалась в конце рабочего участка. Длина вставки с эластичной пластиной составляла 0.5 м, а ширина была равна ширине рабочего участка. Эластичная пластина состояла из слоя пенолатекса толщиной 4 мм, который приклеивался к алюминиевой пластине. Снаружи на пенолатекс приклеивалась тонкая резиновая пленка, на которую приклеивались тонкие продольные полоски токопроводящей синтетической ткани. Эти полоски по торцам соединялись поперечными полосками, изготовленными из тонких латунных сеток, к которым припаивались электрические провода. Поверх полосок для герметичности наклеивалась тонкая резиновая пленка, а затем приклеивался такой же слой пенолатекса, как и в основании эластичной пластины. Наружная поверхность пенолатекса была гидравлически гладкой. При пропускании постоянного тока через синтетическую ткань эластичная пластина нагревалась. За счет теплоизоляционных свойств пористых слоев пенолатекса тепло сохранялось внутри пластины. При этом механические характеристики эластичной композитной пластины изменялись, что влияло на характеристики ПС над пластиной. Контроль температуры на поверхности пластины и в ПС осуществлялся при помощи микротермопар МТ-54. Напряжение тока составляло 19.2В, а сила тока 5.9А. Измерение профилей продольной скорости проводилось на расстоянии 0.485 м от передней кромки вставки (на расстоянии 2.485 м от начала рабочего участка). В зависимости от температуры воды изменялись механические характеристики эластичной пластины. При холодной воде форма профиля скорости при обтекании эластичной пластины незначительно отличалась от эталонной (жесткой) пластины. В процессе работы насоса вода в замкнутой системе гидродинамического стенда нагревалась, и эффективность эластичной пластины возрастала: в профиле скорости увеличилась толщина буферной области, а в области турбулентного ядра профиль скорости стал подобен при течении растворов полимеров. При нагревании эластичной пластины с помощью ее токопроводящих слоев эффективность пластины увеличилась.

На рис. 12 приведены формы профилей скорости при обтекании гладкой жесткой ( *a* ) и различных видов эластичных ( *b* ) пластин при малой величине  $\varepsilon \leq 0.05\%$  [7, 11, 12, 15].

В таблице 1 буквой S обозначена серия опытов, буквой N – номер кривой, буквами NN – № протокола опытов. В отличие от предыдущих ис-

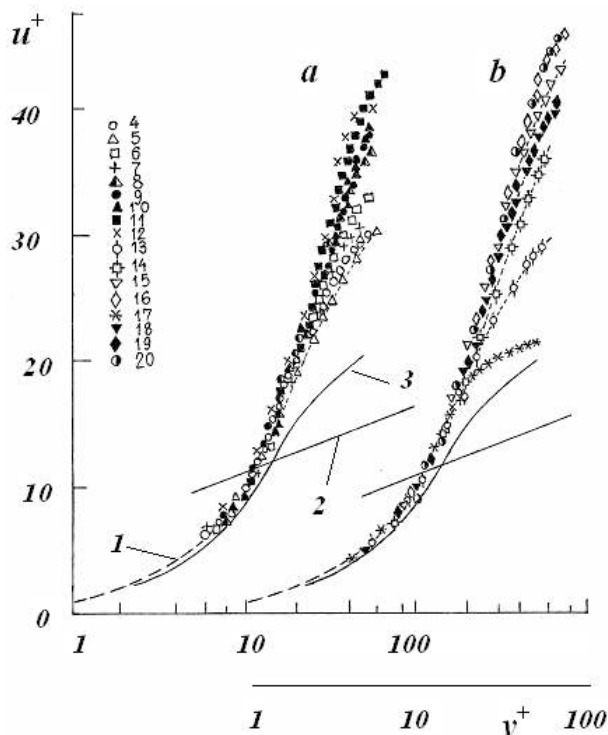


Рис. 12. Профили скорости при обтекании эластичных пластин в гидродинамическом стенде: 1, 2 – закономерности течения в вязком подслое и турбулентном ядре при обтекании жесткой пластины, 3 – течение в буферной области; а – кривые 4 – 12; б – кривые 13 – 20. Условия опытов даны в таблице 1

следований эластичная пластина размещалась по всей длине рабочего участка. Конструкция рабочего участка позволила исследовать три варианта эластичных пластин. Течение в буферной области (кривая 3) записывается различными зависимостями, приведенными в [7, 15]. На рис. 12 а все серии опытов соответствуют экспериментам на жесткой пластине. На рис. 12 б опыты серии В соответствуют измерениям на эластичной мембранной пластине, опыты серии ВТ – на нагреваемой мембранной пластине, опыты серии П-4 – на комбинированной эластичной пластине, изготовленной из полосок пенополиуретана, обтянутых мембранной пленкой, опыты серии П-24 и П-31 – на монолитной пластине, выполненной из пенополиуретана. Конструкция эластичных пластин и их механические характеристики приведены в [7]. Эластичные пластины имели такие же размеры, как и эталонная жесткая пластина: длина и ширина соответствовали размерам рабочего участка. Условия экспериментов и обозначение кривых даны в таблице 1.

Табл. 1. Условия экспериментов к рис. 12

S	N	x см	U <sub>m</sub> см/с	Re · 10 <sup>-5</sup>	NN
a	4	30	10.5	1.03	XXIX
a	5	84.2	10.5	1.175	XXVII
a	6	144.0	8.7	1.24	Б-66
a	7	73.5	7.5	0.74	Б-4
a	8	196.0	8.7	1.69	Б-67
a	9	118.7	10.6	1.68	XXX
a	10	118.7	11.5	1.88	XXX
a	11	118.7	17.0	3.47	XXX
a	12	73.4	7.5	0.74	Б-4
b	13	121	8.5	1.02	В-1
b	14	274	9.0	2.44	В-5
b	15	264	10.4	1.71	В-25
b	16	287	13.6	2.43	В-40
b	17	40	9.5	0.44	ВТ-43
b	18	165	12.0	2.16	П-24
b	19	225	14.9	2.0	П-4
b	20	122	8.7	2.52	П-31

Профили скорости при обтекании жесткой пластины (рис. 12 а) в зависимости от числа Рейнольдса соответствовали закону  $u^+ = y^+$  до  $y^+ = 40$ . При увеличении числа Рейнольдса наступали последующие этапы перехода и профили скорости отклонялись от этого закона. При обтекании эластичных пластин (рис. 12 б) этот закон выполнялся только до  $y^+ = 30$ . Выше по толщине ПС наклон профиля увеличивался. Это объяснялось теми же причинами, как и у жесткой пластины, а также тем, что свойство ПС при обтекании эластичных пластин зависят от конструкции пластин и их механических характеристик, которые, в свою очередь, зависят от температуры воды. Например, в серии экспериментов ВТ-43 при нагревании эластичной мембранной пластины ее натяжение и упругость существенно уменьшились [7]. В результате под действием касательных напряжений на стенке могла возникнуть волновая динамическая шероховатость, которая создавала периодические колебания этих поперечных деформаций в продольном направлении. В связи с этим профиль скорости (см. рис. 12 б, кривая 17) стал соответствовать обтеканию эластичной пластины турбулентным ПС, подобно соответствующим профилям скорости при обтекании эластичных пластин при формировании турбулентного ПС [14, 15]. Профили скорости, измеренные в районе овальной лунки ЛЗ (рис. 8, 9), приведены на рис. 13, 14 в универсальных координатах. Как

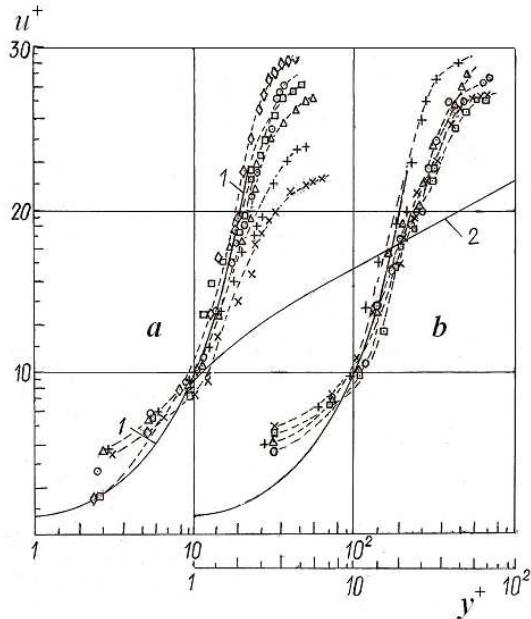


Рис. 13. Продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ: 1 – закономерности течения в вязком подслое, 2 – в буферной области и ядре турбулентного ПС, а –  $U_m = 15$  см/с, б –  $U_m = 19$  см/с. Обозначение символов дано в тексте

и на рис. 10, 11, измерения в сечениях при различных координатах  $x$  обозначены теми же символами. По сравнению с данными, приведенными на рис. 12 для жесткой и эластичных пластин, профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ имеют ряд отличительных признаков. Первый отличительный признак состоит в том, что при всех указанных на рис. 13, 14 скоростях основного потока профили скорости при  $y^+ \leq 10$  отличаются от профиля  $u^+ = y^+$ , соответствующего профилю скорости в ламинарном подслое. Такая форма профиля была приведена в [12, 16] при наличии отрицательного градиента давления. В соответствии с рис. 8, 9 вблизи стенки профили скорости имеют перегибы вследствие вихревых структур, формирующихся в лунке. При исследовании восприимчивости ПС к вносимым в него продольным вихревым структурам профили скорости также расположены внутри ламинарного профиля, но при  $10 \leq y^+ \leq 18$ . Исключением от этой закономерности являются два профиля скорости, измеренные в 1 и 2 сечениях – соответственно на горизонтальной пластине перед лункой и на переднем крае лунки при  $U_m = 15$  см/с, когда в лунке формируется поперечный вихрь.

Второй отличительный признак формы профилей скорости при обтекании лунки ЛЗ от фор-

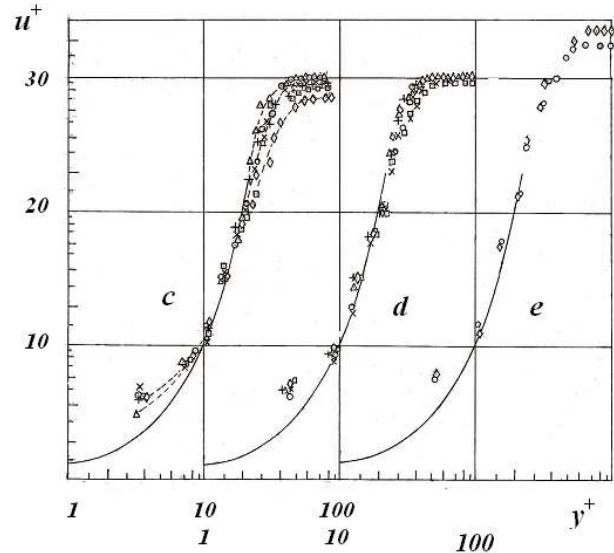


Рис. 14. Продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ: с –  $U_m = 22$  см/с, d –  $U_m = 27$  см/с, e –  $U_m = 35$  см/с. Обозначение символов дано в тексте

мы профилей при обтекании жесткой и эластичных пластин состоит в следующем. Профили скорости при обтекании жесткой и эластичных пластин (рис. 12) до  $y^+ = 30$  соответствовали закону  $u^+ = y^+$ . При обтекании лунки ЛЗ этот закон выполняется только для некоторых профилей скорости в диапазоне  $10 \leq y^+ \leq 24$ .

Третий отличительный признак формы профилей скорости при обтекании лунки ЛЗ состоит в следующем. При скорости  $U_m = 15$  см/с и  $U_m = 19$  см/с (рис. 13) в зависимости от места измерения над лункой профиль скорости при  $y^+ \geq 20$  отклоняется от ламинарной формы и приобретает форму, характерную для турбулентного ПС. При увеличении скорости (рис. 14) различие профилей скорости в сечениях измерения становится незначительным, и профили скорости практически совпадают с ламинарной формой профиля скорости. При увеличении  $y^+$ , при  $y^+ \geq 40$  отклонение формы профиля скорости увеличивается и становится подобным отклонению профиля скорости при отрицательных градиентах давления и исследовании восприимчивости ПС [12, 16].

При скорости  $U_m = 15$  см/с (рис. 13 а) профили скорости, измеренные в сечениях 1 (ромбы), 2 (квадраты) и б (круги) до  $y^+ = 25$  практически совпадают с профилем ламинарного подслоя при обтекании жесткой пластины (эталон). В 1 и б сечениях при обтекании лунки ЛЗ профили скорости измерены на горизонтальной поверхно-

сти перед и за лункой, а во 2 сечении – на переднем краю лунки. При этой скорости изменение давления в окрестности лунки незначительное, поэтому профили в указанных местах отличаются только при  $y^+ \geq 25$ . В 3 (треугольник), 4 (крест) и 5 (х) сечениях в лунке формируются указанные выше вихревые структуры, что приводит к отклонению формы профилей в этих сечениях от эталона. Отклонения в форме профилей возрастают по мере приближения к заднему краю лунки. В 5 сечении (измерение в районе заднего края лунки) отклонение формы профиля максимальное, так как в этом месте сформировались вихревые структуры, и происходит периодические выбросы жидкости из лунки.

При возрастании скорости, при  $U_m = 19$  см/с (рис. 13 б), профили скорости практически во всех сечениях совпадают и, начиная с  $y^+ = 20$ , отклоняются от эталона, но меньше, чем при  $U_m = 15$  см/с (рис. 13 а). При дальнейшем возрастании скорости, при  $U_m = 22$  см/с (рис. 14 с), отклонение от эталона уменьшается. При  $U_m = 27$  см/с (рис. 14 д) совпадение с эталоном сохраняется до  $y^+ = 30$ , а различие профилей скорости в сечениях еще меньше. При  $U_m = 35$  см/с (рис. 14 е) профили скорости совпадают между собой до  $y^+ = 50$ . Таким образом, формы профилей скорости отражают особенности структуры течения в лунке и формирование двух режимов течения в овальной лунке. Представление профилей скорости в логарифмических координатах оказалось наиболее информативным.

## ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных результатов обтекания круглой и овальной лунок позволил сделать следующие выводы:

1. Приведенные на рис. 1–3 профили продольной пульсационной скорости при обтекании круглой лунки Л21 при  $U_m = 9.8$  см/с, 11.4 см/с и  $U_m = 12.8$  см/с позволили определить закономерности формирования вихревых структур в лунке в зависимости от скорости основного потока. При росте скорости динамические процессы течения внутри лунки возрастают. При  $U_m = 9.8$  см/с профили скорости в 1 и 6 сечениях имеют сходство с характерной формой пульсационного профиля скорости при обтекании гладкой жесткой пластины на соответствующих этапах перехода. В 6 сечении форма профиля скорости имеет особенность, которая обусловлена влиянием вихревых структур внутри лунки. В остальных сечениях форма профилей скорости показывает, как изме-

няется течение внутри лунки. При  $U_m = 11.4$  см/с (рис. 2) характер и вид профилей скорости аналогичный. Отличие состоит в том, что в 3–5 сечениях максимальные значения пульсационных профилей располагаются ниже горизонтальной плоскости рабочего участка внутри лунки. Форма вихревых структур внутри лунки и динамический процесс поведения этих вихревых структур внутри лунки при  $U_m = 12.8$  см/с (рис. 3) существенно изменяются, что влияет на кинематические характеристики не только внутри лунки, но и в ПС над лункой. Таким образом, форма пульсационных профилей скорости позволяет охарактеризовать два режима формирования вихревых структур внутри круглой лунки. Это подтверждается картинками визуализации обтекания круглых лунок, приведенных в [4, 5]. Приведенные на рис. 4 зависимости распределения толщины вытеснения в окрестности лунки от скорости основного потока показали, что формирующиеся вихревые структуры в лунке при различных режимах течения определяются характером вихревых структур в ПС перед лункой и распределением давления в лунке и ее окрестности. Формы кривых подтверждают приведенный выше вывод.

2. Приведенные на рис. 5 картины визуализации обтекания круглой лунки Л18 при  $U_m = 3.5$  см/с позволили зафиксировать динамический процесс формирования в лунке пары продольных веретенообразных вихрей. При  $U_m = 4.4$  см/с внутри лунки возникает поперечный вихрь, соединяющийся с парой веретенообразных вихрей. При этом формирующаяся пара продольных вихрей, вытекающих из лунки, имеет поперечный размер, превышающий диаметр лунки. Визуализация течения внутри овальной лунки Л3 позволила обнаружить отличия от течения внутри круглой лунки. Так, при меньшей скорости в овальной лунке вначале формируется поперечный вихрь. С ростом скорости формируется пара продольных веретенообразных вихрей, которые вращаются в противоположную сторону, по сравнению с круглой лункой (рис. 6) и за счет увеличения размера лунки в поперечном направлении наклонены под углом к продольной оси симметрии лунки. При дальнейшем увеличении скорости в овальной лунке формируется пара веретенообразных вихрей (рис. 7), как и в круглой лунке. Но теперь процесс становится динамическим, и вихри возникают и разрушаются поочередно с обеих сторон относительно продольной оси лунки. При обтекании овальной лунки Л3 за лункой также формируется пара продольных вихрей, но расстояние  $\lambda_z$  между этими вихрями всегда меньше ширины овальной лунки.

3. Продольные осредненные профили скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ приведены в традиционных безразмерных координатах (рис. 8, 9). Для улучшения информативности эти профили были перестроены в соответствии с работой Репика [17] в логарифмических координатах (рис. 10, 11), а также в универсальных координатах (рис. 13, 14). Это позволило обнаружить три характерных отличительных признака формы продольных осредненных профилей скорости, взаимосвязанных со структурой вихревых систем внутри лунки, при обтекании овальной лунки для всех измеренных скоростей потока. Указанная последовательность построения профилей скорости в различных координатах позволила сформулировать особенности форм профилей скорости при обтекании овальной лунки ЛЗ. Наиболее информативной является представление профилей скорости в универсальных координатах.

Авторы приносят глубокую признательность сотрудникам лаборатории теплового моделирования Института физико-технических проблем энергетики Литовской Академии Наук Пядишусу А. А., Зигмантасу Г. П. и Янушасу В. И. за содействие при проведении экспериментальных исследований.

1. *Бабенко В. В.* Исследование взаимодействия и управления различных когерентных структур в пристенных течениях.– Отчет о научно-исследовательской работе. Институт гидромеханики НАНУ: 2001, 0100V004768, Инв. № 1.3.7.12.– 6–69 с.
2. *Гортышов Ю. Ф., Олимпиев В. В., Попов И. А.* Эффективность промышленно перспективных интенсификаторов теплоотдачи // Известия Академии наук, Энергетика.– 2002.– № 3.– С. 102–118.
3. *Коваленко Г. В., Халатов А. А.* Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладная гидромеханика.– 2008.– 10 (82), № 1.– С. 23–32.
4. *Бабенко В. В., Мусиенко В. П., Турик В. Н., Милюков Д. Е.* Визуализация обтекания полусферических углублений // Прикладная гидромеханика.– 2010.– 12 (84), № 4.– С. 3–25.
5. *Бабенко В. В., Мусиенко В. П., Турик В. Н.* Кинематические характеристики потока при обтекании полусферических углублений // Прикладная гидромеханика.– 2012.– 14 (86), № 3.– С. 3–21.
6. *Бабенко В. В.* Проблема восприимчивости пограничным слоем различных возмущений // Бионика.– 1988.– Вып. 22.– С. 15–23.
7. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В.* Экспериментальные исследования пограничного слоя.– К.: Наукова думка, 1978.– 184 с.
8. *Гачичеладзе И. А., Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К. и др.* Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Тепло-массообмен, ММФ–88. Проблемные доклады.– Минск: ИТМО АН БССР, 1988.– С. 83–125.
9. *Афанасьев В. Н., Веселкин В. Ю., Леонтьев А. И. и др.* Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на гладкой поверхности.– М.: МГТУ: 1991, ч. I: 56с.– ч. II: 139с с.
10. *Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М.* Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сибирский физико-технический журнал.– 1992.– 1.– С. 77–85.
11. *Иванов В. П., Бабенко В. В., Блохин В. А.* Исследование поля скоростей в гидродинамическом стенде малой турбулентности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости // Инж.-физ. журнал.– 1979.– 37, № 5.– С. 818–824.
12. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В., Цыганюк А. И. и др.* Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– К.: Наукова думка, 1985.– 283 с.
13. *Бабенко В. В., Abbas F. Mahmood, Гнитецкий Н. А.* Взаимодействие пограничного слоя с трехмерными возмущениями // Прикладная гидромеханика.– 2011.– 13 (85), № 3.– С. 3–22.
14. *Бабенко В. В., Канарский М. В., Коробов В. И.* Пограничный слой на эластичных пластинах.– К.: Наукова думка, 1993.– 264 с.
15. *Babenko V. V., Chun H. H., Inwon Lee.* Boundary Layer Flow over Elastic Surfaces. Compliant Surfaces and Combined Methods for Marine Vessel Drag Reduction.– Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York...: Butterworth-Heinemann, Elsevier publishers, 2012.– 613 p.
16. *Репик Е. У., Соседко Ю. П., Тронина Н. С.* Исследование структуры течения в пристенной области турбулентного пограничного слоя.– Пристенные турбулентные течения: Новосибирск: Наука СО, 1975.– 186–202 с.
17. *Babenko V. V.* Experimental investigation of the boundary layer over rigid and elastic plates.– AGARD FDP Workshop on High Speed Body Motion in Water: Kiev, Ukraine, 1998.– P. 9 (1–24) p.
18. *Иванюта Ю. Ф., Чекалова Л. А.* Экспериментальное исследование турбулентного течения в трубе слабых растворов полимеров // Инж. Физ. Журнал.– 1970.– 18, № 5.– С. 1085–1093.
19. *Кутателадзе С. С., Миронов Б. П., Накоряков В. Е., Хабакашева Е. М.* Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений.– Новосибирск: Наука СО, 1975.– 166 с.
20. *Кутателадзе С. С., Хабакашева Е. М., Орлов В. В., и др.* Экспериментальные исследования структуры пристеночной турбулентности и вязкого подслоя.– Турбулентные сдвиговые течения: Москва: Инженерная механика. Том 1, 1982.– 92–108 с.
21. *Репик Е. У.* Исследование внутренней структуры турбулентного пограничного слоя // Тр. Ценр. Аэрогидродинам. Ин-та.– 1965.– Вып. 972.– С. 3–41.
22. *Бабенко В. В., Гнитецкий Н. А.* Пограничный слой на регулируемой эластичной пластине // Бионика.– 1993.– Вып. 26.– С. 21–27.