

УДК 532.57 532.517 536.53 533.6

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЙ

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

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

Получено 02.12.2011

Представлены новые результаты экспериментальных исследований обтекания двух полусферических сегментных углублений различного диаметра и глубины, имеющих закругленные края. Эксперименты проведены в замкнутой гидродинамической трубе с помощью специальных приспособлений. На различных расстояниях в окрестности и над лунками измерены профили продольной осредненной и пульсационной скорости с помощью 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

Наведені нові результати експериментальних дослідів обтікання двох напівсферичних сегментних заглиблень різного діаметру та глибини, що мають закруглені крайки. Експерименти проведені у замкнутій гідродинамічній трубі за допомогою спеціальних приладів. При різних відстанях навколо та над лунками зроблені виміри профілів поздовжньої осередненої та пульсаційної швидкості за допомогою лазерного анемометра. Знайдені нові фізичні особливості течії вихрових структур у тримірних заглибленнях. Класифіковано три характерних режиму течії вихрових структур у лунках у залежності від чисел Рейнольдса.

New results of experimental researches of flow of two hemispherical segment deepening's of various diameter and depth, having the rounded off edges are presented. Experiments are lead in the closed hydrodynamic pipe 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 flow of vortical structures in three-dimensional deepening are found out. Three characteristic conditions of flow of vortical structures in cavities depending on Reynolds's numbers are classified.

ВВЕДЕНИЕ

Обзор проблемы обтекания различных углублений выполнен в [1–4 и др.]. Анализ проведенных ранее исследований показал, что течение в лунке имеет нестационарный характер. В лунках формируются различные типы вихревых структур, форма и характеристика которых зависят от ряда параметров. К таким параметрам относятся скорость потока, число Рейнольдса Re , режим течения в потоке перед углублением, соотношение геометрических параметров углубления и др. [1, 4].

В работе [5] приведены результаты измерений продольной осредненной скорости в полусферической лунке в центральном продольном сечении $ХОУ$ при двух значениях числа Re , равных 440 и 1140. Число Re вычислено по эквивалентному гидравлическому диаметру канала. Безразмерный параметр $h/d = 0.5$. Величина h обозначает глубину лунки, а d – ее диаметр. Кроме того, были измерены профили продольной осредненной скорости в трансверсальном направлении при перемещении датчика измерения в поперечном сечении относительно направления потока в плоскости, проходящей через ось симметрии лунки. При меньшем числе Re датчик располагался на глубине примерно одной трети глубины лунки h по центральной

оси лунки, а при большем числе Re – на половине глубины h . При различных числах Re изменяется форма и структура вихрей в лунке. При указанных направлениях перемещения датчика невозможно охарактеризовать вихревую структуру потока.

В работе [6] с помощью лазерного анемометра измерены распределения средней и пульсационной продольной составляющей скоростей потока в районе лунки. Опыты проведены в рабочем канале высотой 0.014 м, расстояние до лунки составляло 0.65 м при скорости потока 1.6 м/с. Лунка была выполнена в виде сферического сегмента диаметром 0.046 м и глубиной 0.012 м ($h/d = 0.27$). Перед лункой было развитое турбулентное течение. Измерения были выполнены в продольной плоскости симметрии лунки при различных значениях продольной координаты: 15 мм перед лункой; в центре лунки; 5 мм, 10 мм, 20 мм и 60 мм за лункой. Если в начале лунки профиль скорости в поперечном сечении канала был симметричным, то в районе лунки у дна наблюдалось противоположное направление скорости. Обнаружено, что лунка является источником повышенных пульсационных скоростей. Уровень пульсаций за лункой на расстоянии 20 мм достиг 4% по сравнению с 2.5% перед лункой. Недостатки методики прове-

дения измерений – такие же, как и в работе [5]. Аналогичные измерения выполнены в [7] в канале прямоугольного сечения высотой 0,015 м и шириной 0,115 м (рис. 1). Углубление находилось на расстоянии 0,66 м от входа в канал. Радиус сферы лунки был 0,028 м, глубина – 0,012 м и диаметр – 0,046 м ($h/d = 0.26$), число Re, вычисленное по половине толщины канала, составило $1.2 \cdot 10^4$. Скорость основного потока составляла 1,5 м/с. Таким образом, параметры лунки и скорость потока были аналогичными, как и в [6]. Отличие состояло в том, что внутри лунки измерения были выполнены в трех сечениях. В пристеночной части лунки наблюдалось рециркуляционное течение. За ближней по потоку кромкой лунки, где происходит формирование нового пограничного слоя (ПС), профиль скорости деформирован, наибольшее значение деформации которого находится посередине лунки. Процесс восстановления профиля скорости к исходному невозмущенному профилю, как и восстановление распределения давления на поверхности лунки, происходит на расстояниях порядка 1–2 калибров лунки. Влияние лунки на ПС на верхней стенке канала практически не сказывается. Зафиксированная деформация профиля средней скорости обусловлена изменением структуры турбулентности и сложным воздействием трехмерного течения в лунке на ПС. Об этом же свидетельствуют измеренные профили пульсационной скорости, на которых формируются дополнительные максимумы. Пульсационные профили скорости имели такой же вид, как и в [6]. По нашим измерениям такая форма профилей характеризует переходный ПС. Кроме того, были измерены профили скорости на расстоянии 20 мм за лункой в трансверсальном направлении на расстоянии 20 мм от продольной оси симметрии лунки, т. е. примерно в районе края лунки. Результаты многочисленных измерений профилей продольной осредненной и пульсационной скоростей приведены также в [8–10].

Бабенко В. В. и Мусиенко В. П. с 1989 г. начали проводить в Институте гидромеханики НАН Украины (Киев) исследования обтекания различных видов углублений водным потоком. Визуализация потока при проведении экспериментальных исследований в водном потоке показала, что в зависимости от скорости потока лунка генерирует в ПС при малых скоростях возмущения типа нелинейных волн Толлмина-Шлихтинга, а при увеличении скорости – пару продольных вихрей. Была разработана лунка, дно которой выполнено из эластичной пленки [11]. Центр лунки соединялся со штоком, который с помощью механической сис-

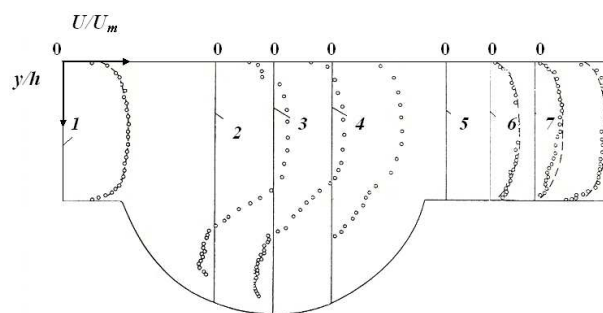


Рис. 1. Распределение продольной скорости по высоте канала:

1 – 15 мм до лунки; 2 – 10 мм от центра лунки, выше по потоку; 3 – центр лунки; 4 – 10 мм от центра лунки, ниже по потоку; 5 – 5 мм за лункой; 6 – 20 мм за лункой; 7 – 60 мм за лункой; штриховая линия – профиль скорости $1/7$ степени

темы перемещался. При этом глубина лунки и ее геометрические параметры при проведении экспериментов могли изменяться в широких пределах в зависимости от скорости потока или при постоянной скорости. Это давало возможность проводить цикл исследований для выяснения определяющих параметров задачи без остановки процесса и замены лунок. Кроме того, автоматическая система управления позволяла задавать колебание дна лунки в широком диапазоне частот. При этом можно было генерировать в пограничном слое нелинейные волны и определять закономерности их развития. При увеличении скорости потока колебания эластичной лунки позволяли задавать частоту выбросов вихревых систем из лунки. В [11] приводятся результаты исследования частотных характеристик колебания лунки, нанесенных на диаграмме нейтральной устойчивости, что позволило определить диапазон вынужденных неустойчивых колебаний в пограничном слое за лункой.

В [12, 13] представлены результаты исследования обтекания водным потоком сегмента полусферической лунки. Приводятся картины визуализации обтекания лунок различной формы (круглой, эллиптической и полукруглой в плоскости обтекаемой пластины). При обтекании круглой лунки выполнены измерения продольного осредненного профиля скорости с помощью лазерного анемометра. Измерения проводились перед и за лункой, а также в пяти сечениях вдоль лунки в районе продольной оси лунки. В этой же плоскости построены линии равных скоростей на различных расстояниях над обтекаемой пластиной с лункой. В [14] приводятся результаты измерения профилей продольной и пульсационных скоростей при обтекании круглой лунки в водном потоке. Диа-

метр лунки составлял $2.6 \cdot 10^{-2}$ м, глубина лунки – $0.7 \cdot 10^{-2}$ м, $h/d=0.27$, скорости потока, измеренные с помощью лазерного анемометра, составляли: $U_{\infty} = 5.86 \cdot 10^{-2}$; $8.15 \cdot 10^{-2}$; $10.06 \cdot 10^{-2}$; $11 \cdot 10^{-2}$; $13.6 \cdot 10^{-2}$ и $17.5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Показано, что в зависимости от скорости потока форма профилей скорости и их развитие вдоль лунки существенно изменяются. Как и в [7], измерены характеристики потока вдоль лунки на различных расстояниях в трансверсальном направлении. В [15] на основе картин визуализации обтекания круглых лунок при различных скоростях основного потока предложены некоторые безразмерные параметры для определения эффективности лунок.

Начиная с 2000 г., В. В. Бабенко, В. Н. Турик, А. В. Воскобойник и В. А. Воскобойник проводили экспериментальные исследования кинематических характеристик пограничного слоя над пластиной с полусферической лункой при обтекании ее воздушным потоком. В [16–20] приведены результаты экспериментальных исследований осредненных и пульсационных характеристик в окрестностях и внутри полусферической лунки, выполненных с помощью термоанемометра. Измерены также спектральные характеристики продольной пульсационной скорости вдоль лунки на уровне обтекаемой пластины и внутри лунки. Визуализация обтекания лунки осуществлялась с помощью разработанного генератора дыма. Отличия от измерений при обтекании водным потоком заключались в том, что измерения проводились в лунке при больших числах Re , глубина лунки равнялась радиусу диаметрального сечения лунки, кромки лунки были острыми.

Анализ указанных исследований показывает, что в настоящее время еще нет четкого представления о характере течения потока над гладкой поверхностью с лункой. Недостаточно выполнена визуализация потока, необходимая для анализа пространственного и нестационарного поведения вихрей в лунке и выбора места измерений профилей скорости. Измерения ограничены одним значением скорости. Недостаточно изучена роль внешних возмущений ПС на характер течения в лунке. Не исследована частота выбросов вихревых структур из лунок в зависимости от параметров набегающего потока. Кроме того, не было выполнено экспериментальное исследование кинематических характеристик потока при обтекании углублений в зависимости от параметров подобия. За исключением [7, 13, 14], все измерения выполнены в вертикальной плоскости вдоль продольной оси симметрии лунок. В то же время, визуализация показала, что в лунках наблюдается про-

странственная картина вихревых течений, существенно зависящих от скорости основного потока и когерентных вихревых структур, формирующихся в потоке перед лункой [4]. Не имеется физической картины течения в лунке на основе современных представлений о когерентных вихревых структурах ПС. Не анализируется взаимодействие когерентных вихревых структур ПС, существующих вблизи лунки, с генерируемыми лункой вихревыми структурами. Не выработаны критерии подобия при обтекании лунок в зависимости от особенностей течения потока перед лункой.

На основании анализа известных работ создана программа проведения экспериментальных исследований обтекания трехмерных углублений [4]. Для ее реализации были разработаны различные варианты углублений. Были изготовлены также варианты специальных форм лунок, а также схемы взаимодействия различных лунок между собой и взаимодействия лунок с другими типами генераторов вихрей. Ниже будут приведены результаты экспериментальных исследований на некоторых лунках, приведенных на рис. 2, 3. Форма лунок и результаты исследования обтекания других видов лунок будут приведены в дальнейших публикациях.

В 1989–1991 гг. выполнены экспериментальные исследования обтекания следующих видов лунок. Нумерация лунок дана в порядке периода времени их исследования. В конце 1989 г. и в апреле 1990 г. проводились исследования при обтекании лунки Л1, представляющей собой сферический сегмент, приведенный на рис. 2 вверху слева. Лунки Л1 и Л2 выполнены путем наполнения цилиндрической полости во втулке 2 пластилином (рис. 4). Затем в пластилине соответствующим металлическим шариком выдавливался сферический сегмент с заданными размерами. Наружный диаметр втулки составлял 30 мм, а диаметр цилиндрической полости – 14 мм. Диаметр лунки Л1 составлял 14 мм, а глубина – 3 мм, параметр $h/d=0.214$. Слева от лунки Л1 (рис. 2) показаны три отверстия, через которые инжестировались цветные струйки. Среднее отверстие находилось по продольной оси симметрии лунки, расстояние между крайними отверстиями составляло 13 мм, причем, расстояние между средним и правым (на рис. 2, нижнем отверстии) равно 6 мм. Диаметр крайних отверстий составлял 1 мм, а осевого отверстия – 0.8 мм. Исследование обтекания лунки Л1 проводилось при скорости потока 5; 7.5; 10 и 11.4 см/с. На Л1 волнистыми штриховыми линиями показаны траектории подкрашенных струек, вытекающих из крайних отверстий, для визуализации потока. Верти-

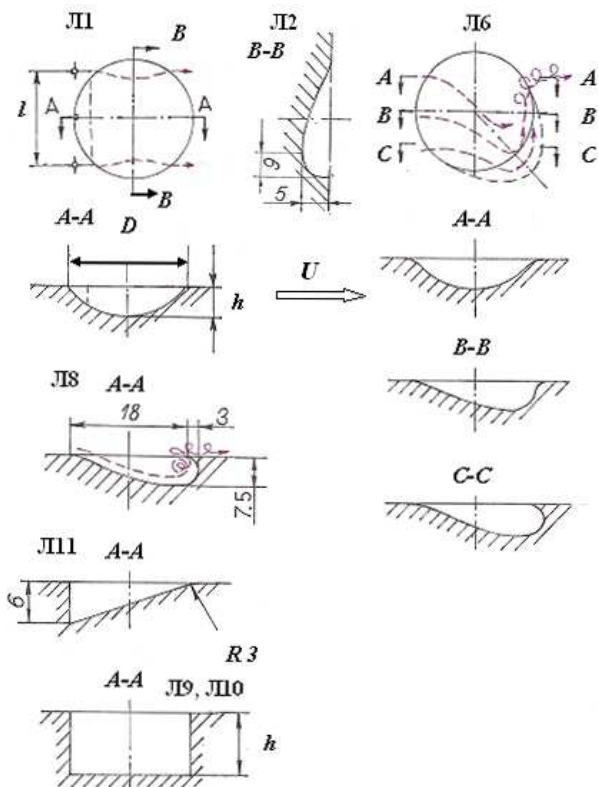


Рис. 2. Варианты стандартной лунки, выполненной в виде сферического сегмента, и цилиндрических лунок

кальная пунктирная линия на основной проекции лунки Л1 и на сечении А-А показывает модификацию лунки Л1, когда в начале лунки выполнена ступенька. Еще одна модификация лунки Л1 представлена на рис. 2 в виде сечения В-В, где правая сторона лунки Л1 по потоку выполнена в виде вертикальной стенки, плавно сопрягающейся с поверхностью сферического сегмента. Этот вариант обозначен лункой Л2. Подробный анализ визуализации этих трех вариантов формы лунки приведен в [4]. Визуализация второго варианта Л1 выполнена в [4] в случае, когда лунка со ступенькой повернута под небольшим углом к направлению потока.

В мае-июне 1990 г. экспериментальные исследования выполнены при обтекании следующих лунок. Одна из втулок 2 (рис. 4) в своей верхней части пропиливалась вертикально на глубину 15 мм. Затем с боковой стороны втулки параллельно наружной плоскости втулки производился пропил до вертикального распила. Отпиленная часть удалялась. Втулка вставлялась в отверстие круглой вставки, и полученная полость заполнялась пластилином заподлицо с обтекаемой поверхностью. На рис. 3 показаны варианты лунок Л3, Л4 и Л5, сформированных в этой полости. На этих лунках

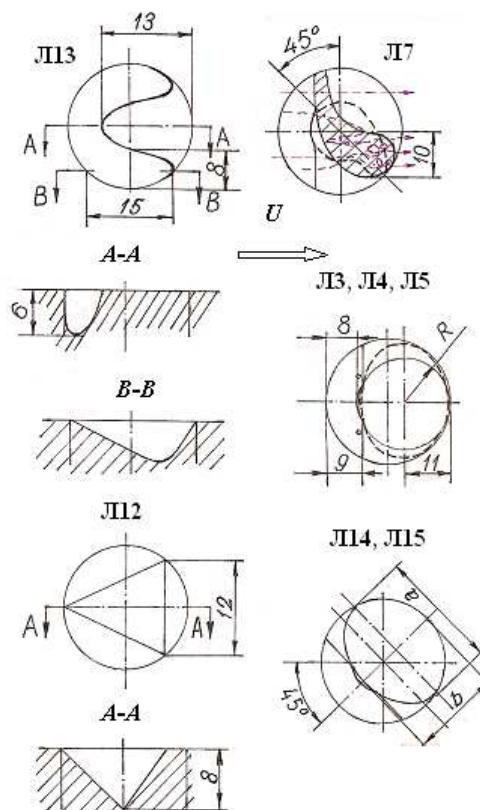


Рис. 3. Варианты нестандартных трехмерных лунок



Рис. 4. Поворотная вставка для размещения различных углублений:
1 – круглая вставка диаметром 0.1 м, 2 – втулки диаметром 0.03 м для формирования углублений, расстояние между осями втулок – 0.06 м

слева сплошной линией показан вертикальный распил, выполненный на расстоянии 9 мм от края лунки так, что сохранились отверстия для визуализации обтекания лунок. При этом после распила на расстоянии 8 мм осталась часть цилиндрической полости во втулке диаметром 14 мм. Это позволило сохранить и третье отверстие для визу-

ализации потока, выполненное по оси симметрии втулки. На схеме этих лунок показаны два варианта лунок: первый вариант (сплошная линия) – это сферический сегмент, выдавленный с помощью металлического шарика радиусом R . Второй вариант – выдавленный в пластине сегмент эллипсоида вращения.

Лунка Л3 представляет собой сегмент эллипсоида вращения с осями 28 и 22 мм (на рис. 3 показана штриховой линией). Глубина лунки Л3 составляет 8 мм. В соответствии с осями эллипса получим $h/d=0.286$ и 0.364 .

Лунка Л4 является также эллиптической. Глубина Л4 составляет 3 мм. Соответственно получим $h/d=0.107$ и 0.136 . Было исследовано обтекание лунок Л3 и Л4, расположенных короткой осью эллипса вдоль набегающего потока (короткий эллипс). Эти же лунки поворачивались на 90° так, что вдоль потока располагалась длинная ось эллипса (длинный эллипс). Кроме того, проводились испытания, когда эллипс был повернут на 45° .

Лунка Л5 является также малой эллиптической лункой, выполненной путем выдавливания в пластине в лунке Л1 сегмента эллипсоида вращения, большая ось которого составляла 14–15 мм, а малая ось – 7.5 мм (короткий эллипсоид). Глубина лунки составляла 6 мм. Геометрические параметры лунки для осей лунки составляли: $h/d=0.4$ и 0.8 .

Лунка Л6 является развитием лунки Л2 и называется нами "капля" (рис. 2). От лунки Л2 капля отличается тем, что под углом 45° по отношению к направлению потока в пластине выполнена полость, которая заглублена дальше за наружный круглый контур лунки. На рис. 2 штриховыми линиями показаны траектории линий тока в лунке Л6 при малой скорости потока. В отличие от лунки Л2 капля лунки Л6 выполнена во втулке 2 (рис. 4) подобно лунке Л3, но в виде сферического сегмента радиусом $R=7.5$ мм.

Лунка Л7, являющаяся также разновидностью капли, приведена на рис. 3 в виде заштрихованной области. Глубина Л7 – 5 мм. Эта лунка выполнена по той же технологии, как и Л3. Штриховыми стрелками показаны траектории визуализационных струек при обтекании Л7. На этом же рисунке приведен штриховым контуром еще один вариант капли, как бы повернутой на 180° по отношению к Л7.

В серии экспериментов, выполненных в мае–июне 1990 г., были исследованы глубокие большие и малые симметричные и несимметричные лунки в виде сферического сегмента, то же самое при обтекании эллиптического сегмента и лунки капли.

В сентябре–ноябре 1990 г. были выполнены экспериментальные исследования со следующими видами лунок. Повторно исследовано обтекание эллиптических лунок Л3 и Л4 (короткий эллипс), при этом у лунки Л3 глубина была не 8 мм, а 6 мм.

Лунка Л8 приведена на рис. 2 (сечение вдоль продольной оси симметрии). Выполнена она по технологии, приведенной для лунки Л3. Эта лунка является разновидностью лунки Л6 типа капля, и мы назвали ее "калоша". Лунка Л8 отличается от Л6 тем, что полость в лунке расположена вдоль продольной оси симметрии.

Лунки Л9–Л11 также выполнены по технологии лунки Л3. В лунке Л3, заполненной пластилином, выдавливалась полость с помощью круглого цилиндрического стержня радиусом R . Варианты лунки Л9 (рис. 2) имели параметры: диаметр 15 мм и глубина 10 мм, 7.5 мм и 4 мм. Соответственно для Л10 – диаметр 18 мм и глубина 8 мм, 6 мм и 4 мм. Лунка Л11 (рис. 2) была изготовлена с помощью круглого усеченного цилиндрического стержня диаметром 18 мм. Лунка Л12 (рис. 3) отличалась от Л9–Л11 тем, что в пластине выдавливалась трехгранная призма так, что верхнее поперечное сечение в виде треугольника вписывалось в круг диаметром 18 мм. Эксперименты проводились в основном при расположении Л12, приведенном на рис. 3. Фотографировалась визуализация обтекания Л12 также при расположении Л12, повернутой на 180° , т. е. тупиковой стороной верхнего поперечного сечения к набегающему потоку, а также при расположении этой стороны под 45° к потоку. Исследовано также обтекание лунки, которая изготавливалась выдавливанием в пластине полости с помощью четырехгранной прямоугольной призмы.

Лунка Л13 (рис. 3 слева сверху) имеет сложную конфигурацию. Наружный диаметр лунки равен 18 мм. С левой части этой лунки удаляется пластилин, образуя полость в виде буквы C глубиной 6 мм. В сечениях А–А и В–В показаны форма углублений в различных частях Л13. При виде сверху эта полость напоминает форму сапога. Лунки Л14 и Л15, приведенные на рис. 3, представляют собой лунки эллиптической формы, как и Л3–Л5 (короткие эллипсы). Лунки Л14 и Л15 повернуты к направлению потока на 45° . Большая ось a эллипса лунки Л14 составляет 20 мм, а малая ось b – 10 мм, глубина лунки в продольном осевом сечении составляет 5 мм, а у лунки Л15 соответственно 11 мм, 5.5 мм и 4 мм. Таким образом, лунки Л14 и Л15 являются более удлиненными по сравнению с Л3–Л4 и имеют подобные размеры, как у лунки Л5.

Кроме приведенных на рис. 2, 3 были исследованы лунки Л16–Л21, представляющие собой лунки в виде сферического сегмента, как и лунка Л1, и имеющие соответствующие геометрические размеры: у Л16 диаметр – 15 мм и глубина – 3 мм; у Л17 – 10 мм и 1.5 мм; у Л18 – 20 мм и 5 мм; у Л19 – 14 мм и 4 мм; у Л20 – 26 мм и 7 мм; у Л21 – 18 мм и 6 мм. Лунки Л16–Л21 отличаются от лунки Л1 и остальных лунок тем, что место соединения лунки с пластиной выполнено при большом радиусе закругления. Например, у лунки Л16 радиус закругления кольца сопряжения состыковывается с поверхностью сферической лунки в районе сферического сегмента, окружность которого в месте сопряжения составляет 12 мм. В поперечном сечении вертикальной плоскости сечения лунки сферическое кольцо сопряжения плавно сопрягается с лункой и гладкой пластиной, в которую вмонтирована лунка, при этом угол состыковки кольца сопряжения с гладкой плоской поверхностью составляет $10^\circ - 12^\circ$. У Л17–Л21 в этом же месте сопряжения выдерживается также минимальный угол. Это позволяет вихревым и волновым структурам плавно вытекать из лунок. Таким образом, были выполнены исследования на различных лунках, которые варьировались по форме (круглые, эллиптические, в форме призм и каплеобразные) и геометрическим параметрам - диаметру и глубине (мелкие, средние и глубокие). Ниже будут приведены результаты экспериментальных исследований поля скоростей при обтекании лунок Л20 и 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 проведены в замкнутой гидродинамической трубе, устройство и фотография которой приведены в [4]. Рабочий участок имел длину 1.0 м и поперечное сечение 0.2×0.02 м. Вода в контур подавалась из бака-наполнителя с системой охлаждения насосом мощностью 2 кВт. Вход и выход рабочего участка для уменьшения турбулентности были тщательно состыкованы с диффузором и конфузуром. На дне рабочего участка имелся прямоугольный вырез, в котором устанавливалась гладкая пластина заподлицо с дном. В этой пластине выполнено отверстие диа-

метром 0.1 м для установки круглой вставки, в которой имелись также два отверстия для установки двух втулок с исследуемыми формами лунок (рис. 4). Расстояние между осями лунок составляло 0.06 м. Круглая вставка могла поворачиваться вокруг своей вертикальной оси симметрии и устанавливаться под разными углами в горизонтальной плоскости по отношению к набегающему потоку. Таким образом, изменялось расположение лунок относительно направления основного потока. Это позволяло визуализировать обтекание одновременно двух лунок, установленных параллельно или друг за другом. Расстояние между соседними лунками и их взаимное расположение по длине изменялись в зависимости от угла поворота вставки.

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 с помощью трубки диаметром 0.8 мм, установленной перед круглой вставкой на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м. Конструкция крепления трубки позволяла варьировать высоту подачи струйки в пределах $y = (0.2 \div 1.0) \cdot 10^{-2}$ м и, таким образом, визуализировать картину обтекания по всей толщине пограничного слоя. 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 во введении.

Процесс обтекания, визуализированный подкрашенными струйками, регистрировался видеокамерой и с помощью фотоаппаратов. Подсветка визуализированной картины обтекания лунок осуществлялась обычными лампами накаливания мощностью 500 Вт, расположенными сверху и сбоку.

Методика проведения экспериментов разработана в [21] и состояла в проведении визуализации обтекания лунок в широком диапазоне скоростей: $3 \div 75$ см/с. Вертикальные оси симметрии двух лунок (рис. 4) находились на расстоянии 0.77 м и 0.83 м от начала рабочего участка. При исследовании одной лунки это расстояние было наибольшим. При исследовании системы лунок расстояние зависит от угла поворота круглой вставки относительно продольной оси симметрии рабочего участка. В зависимости от скорости потока числа Re зависели от дополнительного расстояния на

поверхности конфузора, на котором начинал формироваться пограничный слой [21]. 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] и выбирались соответствующие места для проведения количественных измерений. Профили осредненных и пульсационных скоростей измерены с помощью однокомпонентного лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), разработанного и изготовленного в Институте физико-технических проблем энергетики Литовской Академии Наук.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рис. 5 приведена фотография обтекания лунок Л20 и Л21. Скорость потока составила $U_m = 5.9 \cdot 10^{-2}$ м/с, а числа Re для лунки Л20 составили $Re_d = 1.9 \cdot 10^3$, $Re_x = 7.59 \cdot 10^4$. Числа Re для лунки Л21, расположенной перед лункой Л20, будут отличаться незначительно. Геометрические параметры этих лунок приведены выше, в соответствии с которыми параметр h/d для лунки Л20 составил 0.27 и для Л21 – 0.33. В [4] приведены картины визуализации лунки Л18 (параметр $h/d=0.25$). По геометрическим размерам эта лунка близка к Л21, но из-за меньшей глубины параметр h/d практически такой же, как у лунки Л20. Картины визуализации показали, что при обтекании одиночной лунки Л18 формируется пара продольных веретенообразных (эллиптических) вихрей, вращающихся в лунке в периферической области вдоль потока и в осевом направлении лунки – против потока. Такое вращение вызвано распределением давления внутри лунки.

На рис. 5 приведена фотография визуализации взаимодействия вихревых структур, формирующихся в лунках Л21 и Л20, при продольном расположении этих лунок. Передняя лунка Л21 выполнена по технологии лунки Л3, поэтому на рис. 5 в передней втулке слева виден сектор – металлическая часть втулки 1 (рис. 4). Лунка Л20 (рис. 5, справа) выполнена другим образом: отверстие для втулки в круглой вставке заполнено пластилином, в котором выдавлена круглая лунка Л20 в виде сферического сегмента с указанными выше геометрическими размерами. Посредине кадра видна продольная струйка 2 красного цвета, которая подавалась через трубочку, расположенную от поверхности дна на расстоянии $5 \cdot 10^{-3}$ м

(на рис. 5, слева). Видно, что струйка, инжектируемая из этой трубочки, равномерная при течениях вдоль всего кадра. На расстоянии $3 \cdot 10^{-2}$ м от отверстия для осевой трубочки во втулке 1 (рис. 5, слева) выполнены три отверстия поперек потока. Струйки 3 синего цвета, инжектируемые из этих трех отверстий, движутся в лунке Л21. Крайние струйки изгибаются навстречу друг другу вследствие распределения давления внутри лунки. 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 3, поступающие в лунку Л21, имеют сплошной цвет, так как они обтекают наружную закругленную область лунки Л21. Геометрия отверстий для этих струек изложена выше. После заглупления в лунку крайние струйки разделяются как бы на две. Это свидетельствует, что струйки закручиваются в продольном направлении. Достигая заднего края лунки Л21, струйки частично поворачивают назад под действием уменьшения давления к центру лунки и движутся против потока (на рис. 5 показано светлыми стрелками). При этом формируется пара вихревых областей в виде эллипсоидов вращения. Продольная ось этих вихрей направлена вдоль потока, а поперечная ось симметрии – перпендикулярно к образующей лунки. Поток, визуализируемый средней красящей стружкой 3, размывается и захватывается указанными эллиптическими вихрями. При прохождении крайними струйками 3 области закругления лунки Л21 течение разделяется: часть потока возвращается в лунку и формирует пару эллипсоидных вихрей, а часть потока, расположенного на уровне плоской пластины, движется прямолинейно за лунку Л21. Частично поток в осевой области лунки вытекает из лунки (на рис. 5 показано светлой стрелкой) и присоединяется к визуализационным периферическим струйкам, которые по степени размытости и областям сгущения краски свидетельствуют, что за лункой Л21 формируется пара продольных вихрей.

При независимом обтекании лунки Л20 в лунке и за ней формируются такие же структуры, как и при обтекании лунок Л21 и Л18 [4]. На рис. 5 приведены особенности обтекания лунки Л20, расположенной ниже по потоку за лункой Л21. Условия течения перед лунками Л21 и Л20 различные, поэтому при обтекании лунки Л20 формируются другие вихревые системы. В соответствии с ре-

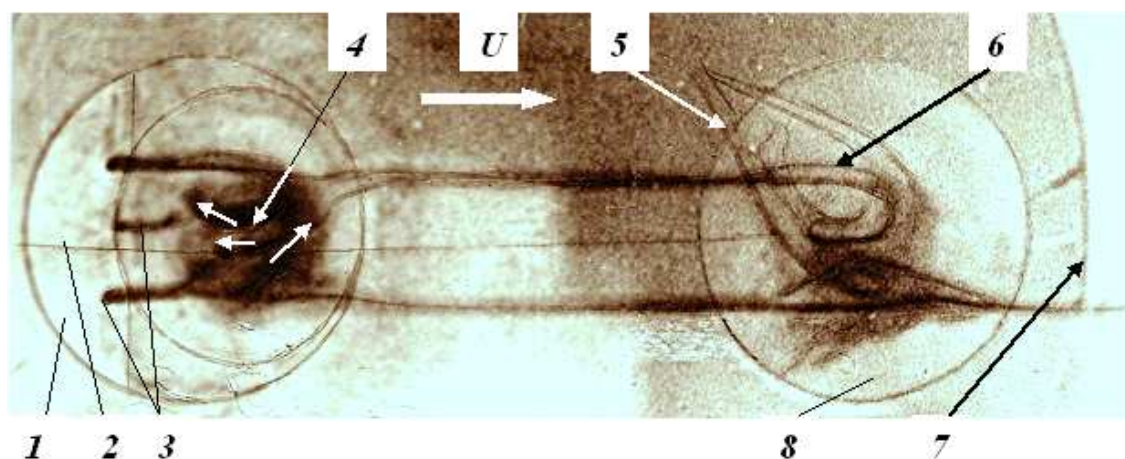


Рис. 5. Взаимодействие вихревых структур, формирующихся в лунках Л20 и Л21:
 1 – передняя втулка (рис. 4) с лункой Л21; 2 – визуализационная струйка, вытекающая из трубки, расположенной в пограничном слое перед втулкой; 3 – визуализационные струйки, вытекающие из пластины перед лункой Л21; 4 – вихревые структуры, формирующиеся в Л21; 5 – вихревые структуры, вытекающие против потока из лунки Л20; 6 – вихревые структуры, формирующиеся в Л20; 7 – контуры круглой вставки (рис. 4); 8 – лунка Л20

зультатами экспериментальных исследований проблемы восприимчивости пограничным слоем различных возмущений [22, 23] на структуру потока, формирующуюся при обтекании лунки, влияют когерентные вихревые структуры (КВС) пограничного слоя перед лункой. В [24] приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия КВС ПС и трехмерных КВС, формирующихся за различными видами генераторов продольных вихрей, установленных на пластине. В [24] приведены макеты различных типов КВС ПС в зависимости от числа Re . При различных скоростях обтекания в ПС будут существовать различные КВС, в зависимости от которых будет видоизменяться вихревая структура потока, формирующаяся за препятствиями в виде генераторов продольных вихревых систем. Очевидно, что при обтекании одиночных лунок особенности формирования вихревых структур в лунках будут также обусловлены вихревыми структурами в ПС перед лункой. При указанном выше числе Re в ПС перед лунками сформировались III – IV этапы переходного ПС. В соответствии с макетами КВС [24] в ПС будут формироваться возмущения в виде трехмерных нелинейных волн, которые не будут существенно влиять на вихревые структуры, формирующиеся в лунке. В ПС перед лункой Л20 сформировалась пара продольных вихрей (рис. 5), под влиянием которых изменилась структура вихрей в лунке Л20. В верхней части на рис. 5, справа увеличилась форма и интенсивность эллипсоидального вихря по сравнению с таким же вихрем

в лунке Л21 (рис. 5, слева). Этот вихрь становится цилиндрическим, торнадоподобным и выступает за границу пластины – он поглощает визуализационную струйку красного цвета. Вихрь, расположенный в лунке Л20 в нижней части рис. 5, также существенно отличается от эллиптического вихря в лунке Л21. Подтверждением цилиндрической формы вихря в лунке Л20 является картина визуализации существующего вытекания части вихря в лунке Л20 против потока (рис. 5, позиция 5). Видно, что цилиндрический вихрь, изображенный на рис. 5, вверху, вращается по часовой стрелке, а на рис. 5 внизу – против. Так как контуры лунки имеют закругленную форму, то вблизи стенки соответственно раскрученные участки цилиндрических вихрей вытекают против потока. Видно, что изображенный в нижней части рис. 5 вихрь вытекает раньше, чем изображенный в верхней части. Это свидетельствует, что при указанной скорости потока частота выбросов вихревых структур из лунки Л20 небольшая, а направление выбросов периодически изменяется на противоположное.

Таким образом, даже при малой скорости потока при взаимодействии различных лунок можно сформировать направленные КВС в ПС за лункой или периодические выбросы вихревых структур из лунки. Рассмотренный характер течения внутри указанных лунок и в их окрестности показывает, что в дальнейшем необходимо подробнее экспериментально исследовать структуру потока в лунках. Для этого измерение поля скоро-

стей следует проводить не только в плоскости симметрии лунки, но и в трансверсальном направлении. Учитывая визуализационную картину обтекания лунок (рис. 5), необходимо соответствующим образом располагать датчики скоростей относительно направления потока внутри лунки в районах эллиптических вихрей и между ними.

Для определения влияния КВС, существующих в ПС перед лункой, на вихревую структуру, формирующуюся в лунках, были выполнены исследования поля скоростей над лункой и в ее окрестности при различных величинах скорости основного потока. Вначале исследования проводились при обтекании лунки Л20 (рис. 6). Расположение вставки оставалось таким же, как и на рис. 5. Отличие заключалось в том, что вместо лунки Л21 устанавливалась вспомогательная втулка, отверстие в которой было заполнено пластилином заподлицо с поверхностью вставки. При обтекании лунки Л20 профили скорости измерялись вдоль продольной оси симметрии лунки при следующих значениях продольной координаты x , отсчитываемой от вертикальной оси симметрии вставки (рис. 4): 1 – 0 мм, 2 – 15 мм (край лунки), 3 – 22 мм, 4 – 30 мм (центр лунки), 5 – 38 мм, 6 – 45 мм (край лунки), 7 – 50 мм (край вставки). На рис. 6 приведены профили скорости, измеренные при указанных координатах x . Средняя скорость потока составляла $U_m = 10.06$ см/с. Профили скорости приведены в безразмерных координатах. Ось y направлена вверх от поверхности пластины, величина δ^* – толщина вытеснения, вычисленная по измеренному профилю скорости, U – значение скорости в точке измерения, U_m – средняя величина скорости, вычисленная по расходу потока через рабочий участок, u' – среднеквадратичное значение пульсационной скорости.

Первоначально были измерены профили скорости при $U_m = 8.15$ см/с. При этом осредненные и пульсационные профили продольной скорости практически такие же, как и при $U_m = 10.06$ см/с (рис. 6). Фотографии визуализации обтекания подобной лунки, приведенные в [4], показали, что при $U_m = 8.15$ см/с только начинает формироваться пара эллипсоидальных вихрей, расположенных вблизи боковых краев лунки. Визуализация обтекания лунки при $U_m = 10.06$ см/с [4] показала, что поперечный размер пары эллипсоидальных вихрей увеличивается. В результате в осевой плоскости лунки эти вихри начинают влиять на пульсационные скорости и величину их максимумов. Анализ формы измеренных профилей скорости при обтекании лунки необходимо проводить с учетом характерных форм продольной осреднен-

ной и пульсационной профилей скорости, измеренных с помощью лазерного анемометра при обтекании плоской пластины в гидродинамическом стенде малой турбулентности [22, 23]. Необходимо также учитывать результаты экспериментального исследования проблемы восприимчивости пограничным слоем различных возмущений [24, 25]. Согласно результатам измерений обтекания плоской жесткой пластины, максимумы профилей пульсационной скорости на первых двух этапах перехода расположены при $u'/U_m \leq 0.3$, при этом максимумы растянуты и примерно равны в диапазоне $y/\delta^* = 0.1 \div 1.5$ [25]. При скорости потока, соответствующей третьему–четвертому этапам перехода (формирование трехмерных продольных возмущений [25]), из такого же расположения максимумов, как и на первых двух этапах перехода, вблизи стенки формируются дополнительные максимумы до $u'/U_m = 0.3$ [25]. Форма профилей скорости при обтекании лунки с $U_m = 8.15$ см/с и $U_m = 10.06$ см/с подобна аналогичным формам профилей скорости, зафиксированным при обтекании плоской пластины на третьем–четвертом этапах переходного ПС.

На рис. 7 приведены профили скорости при $U_m = 11$ см/с. Незначительное увеличение скорости привело к заметному изменению профилей скорости по сравнению с профилями скорости, приведенными на рис. 6. Интенсивность и размеры пары веретенообразных вихрей в лунке, зафиксированные в [4], увеличились с ростом скорости потока. В результате возвратное течение этих вихрей приблизилось друг к другу в районе продольной оси симметрии лунки. При этом скорость основного потока в районе продольной оси симметрии лунки уменьшилась, а давление возросло. Поэтому в районе оси симметрии основной поток искривился и поднялся над уровнем пластины. Соответственно увеличился диаметр эллиптических (веретенообразных) вихрей в лунке, и они стали выступать над поверхностью лунки. Область отеснения основного потока захватила также районы перед лункой и за лункой. Заметно изменились профили пульсационной скорости: увеличились значения максимумов пульсационных скоростей, их расположение по координате y/δ^* , а также появились двойные максимумы по координате y/δ^* . Аналогичные формы пульсационных скоростей были зафиксированы при обтекании плоской пластины на пятом этапе перехода, когда в ПС разрушались λ -образные вихри. При этом максимумы пульсационных скоростей возросли до $u'/U_m = 0.07$, как зафиксировано и на рис. 7.

На рис. 8 приведены профили скорости при

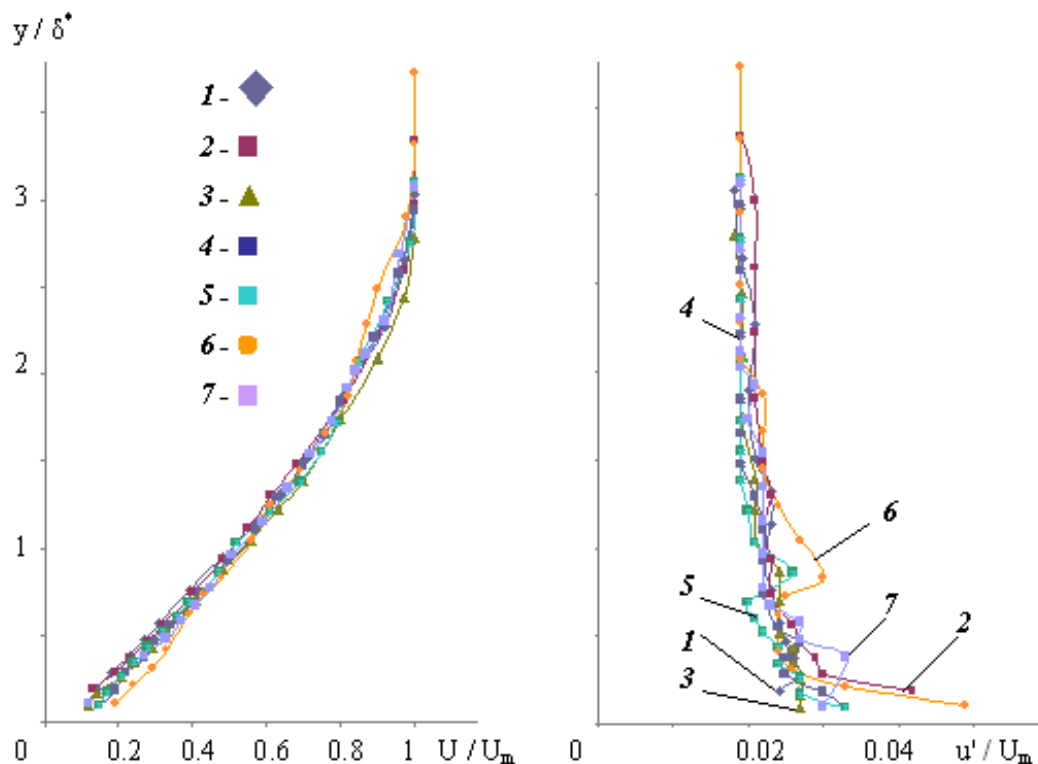


Рис. 6. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л20 при $U_m = 10.06$ см/с

$U_m = 13.7$ см/с. Физическая картина оттеснения основного потока от уровня пластины под действием пары вихрей в лунке такая же, как и на рис. 7. Максимумы пульсационных скоростей уменьшились и были в районе $u'/U_m = 0.037 \div 0.045$, в зависимости от продольной координаты измерения. Подобные формы пульсационных скоростей зафиксированы при измерениях на плоской пластине на шестом этапе перехода, когда значения максимумов уменьшилось до $u'/U_m = 0.05$. В соответствии с макетом развития вихревых структур в плоском ПС [25] такие формы пульсационных скоростей соответствуют парам продольных вихревых структур, сформировавшимся в ПС.

На рис. 9 приведены профили скорости при $U_m = 17.5$ см/с. Формы осредненных профилей скорости показали, что в ПС зафиксирован турбулентный режим течения. Однако форма пульсационных скоростей не соответствует классическим кривым в турбулентном ПС на плоской пластине. Анализ приведенных на рис. 9 кривых следует проводить с позиций проблемы восприимчивости и на основе картин визуализации течения в лунке. Визуализацию при турбулентном режиме течения водного потока с помощью подкрашенных струек

осуществить невозможно. Поэтому в [4] выполнена видеосъемка характера течения в полусферической лунке с острыми кромками при ее обтекании воздушным потоком. Диаметр лунки был 20 мм, а глубина – 9 мм ($h/d=0.45$), $U_m = 3$ м/с, $Re_x = 10^5$. Визуализация выполнена с помощью струйки дыма. При турбулентном режиме течения зафиксирован совершенно другой характер течения внутри лунки. В лунке формируется один вихрь, вращающийся поочередно по часовой и против часовой стрелки. Периодически при вращении по часовой стрелке справа от продольной оси симметрии лунки происходит выброс вихря, после которого начинается формирование нового вихря, а его вращение изменяется: вихрь вращается против часовой стрелки. Через короткое время выброс из лунки происходит с левой стороны от продольной оси симметрии лунки. Цикл чередования выбросов был примерно 0.4 с. Диаметр лунки Л20 составил 26 мм и глубина – 7 мм, соответственно $h/d=0.27$. Для скоростей обтекания, приведенных на рис. 6–9, $Re_x = 1.36 \cdot 10^5$, $1.4 \cdot 10^5$, $1.75 \cdot 10^5$, $2.28 \cdot 10^5$. Лунка Л20 имеет скругленные кромки, а ее параметр h/d меньше почти в 2 раза, чем у лунки, обтекаемой воздухом. Числа Re

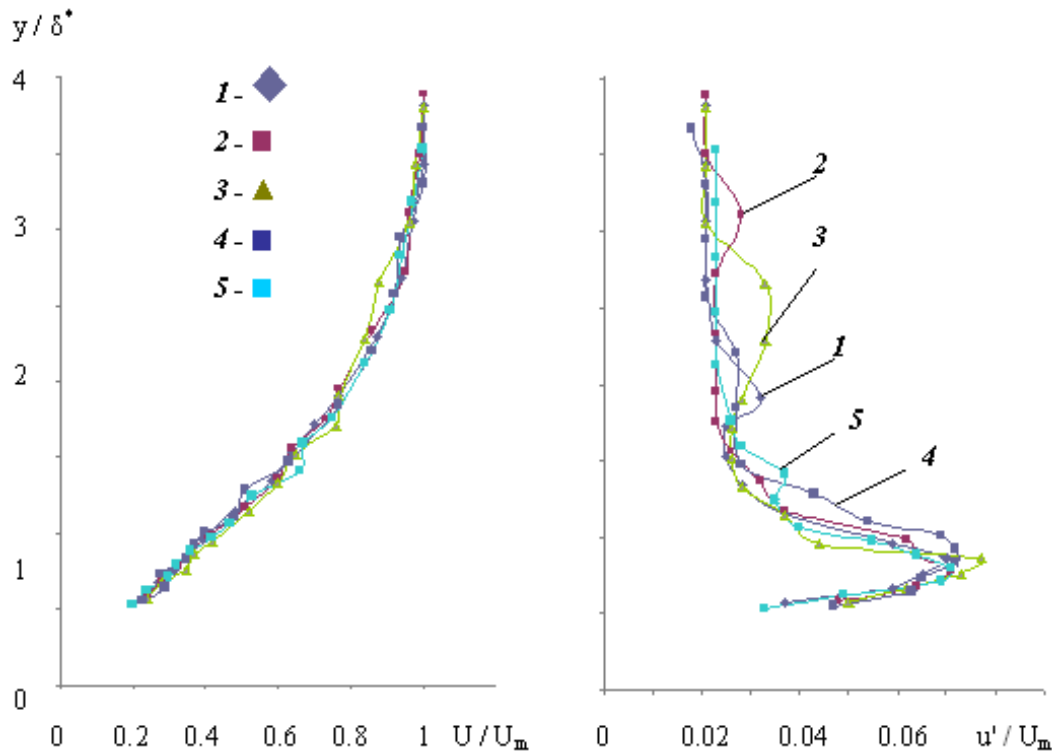


Рис. 7. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л20 при $U_m = 11$ см/с

при обтекании лунки Л20 – того же порядка, что и у лунки, обтекаемой воздухом. Поэтому можно ожидать, что при обтекании лунки Л20 водным потоком при турбулентном режиме течения в пограничном слое вихри, формирующиеся в лунке, будут иметь подобный характер, как и при обтекании лунки воздухом [4].

В [25] приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия трехмерных возмущений, возникающих при обтекании различных видов генераторов вихрей, установленных на пластине, с 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 с помощью генераторов вихрей. Такое взаимодействие наблюдается за генераторами вихрей. При обтекании лунок происходит более сложная картина взаимодействия возмущений. Сформированные вихревые структуры в пограничном слое 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 начи-

нают взаимодействовать с формирующимися вихревыми структурами за лункой. В [11–15] зафиксировано за лункой при малых скоростях обтекания формирование нелинейных волновых структур, которые могут оптимально взаимодействовать с вихревыми структурами ПС, возникающими до лунки на втором–третьем этапах перехода. При возрастании скорости обтекания за лункой формируется пара продольных вихрей, λ_z которой примерно равно диаметру лунки. В этом случае формирующиеся за лункой системы вихрей будут взаимодействовать с вихревыми структурами, возникающими в ПС на четвертом–шестом этапах перехода. При дальнейшем возрастании скорости за лункой формируются вихри, выбрасываемые из лунки поочередно с обеих сторон относительно продольной оси симметрии лунки. Расстояние между этими вихрями будет меньше, чем диаметр лунки. Эти вихревые структуры будут взаимодействовать с λ -образными и продольными вихревыми структурами ПС на плоской пластине, рассмотренными в [4] при турбулентном режиме течения.

Таким образом, приведенные формы профилей на рис. 9 можно объяснить на основании отмеченных выше особенностей взаимодействия и на осно-

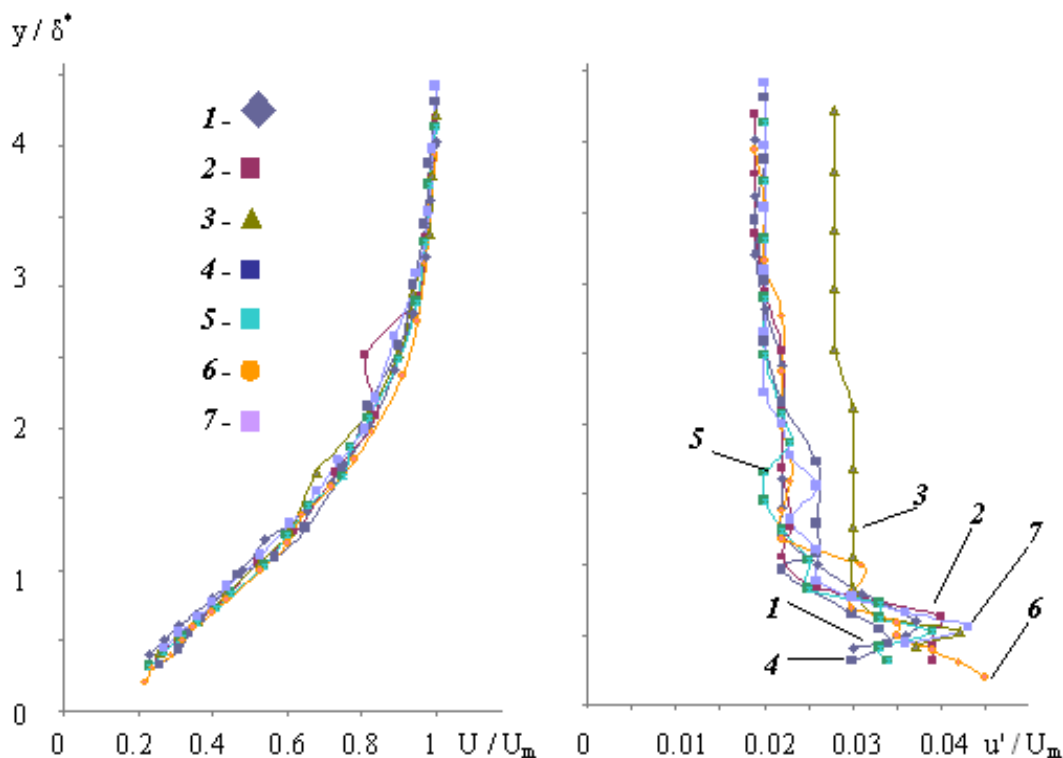


Рис. 8. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л20 при $U_m = 13.7$ см/с

вании обнаруженного характера движения сформировавшихся вихрей в лунке. В связи с нестационарным характером вращения вихрей в лунке, при турбулентном режиме обтекания профили осредненных скоростей по форме отличаются между собой. Так, профиль скорости, измеренный перед лункой (кривая 1), более гладкий, а профиль за лункой имеет перегиб, определяемый выбросами из лунки. В то же время, все профили осредненной скорости, кроме профиля перед лункой, при $y/\delta^* \leq 0.5$ имеют резкий перегиб, свидетельствующий о проскальзывании потока вперед при $y/\delta^* < 0.5$. Это проскальзывание определяется отмеченным вращением вихрей в лунке. Как и при меньших скоростях, течение отесняется от лунки и над лункой искривляются линии тока. С увеличением скорости обтекания отеснение потока определяется увеличением скорости вращения в лунке и увеличением размеров вихря, который выступает за уровень лунки. В этом случае надо анализировать форму профилей скорости с учетом движения вихрей в лунке по и против часовой стрелки. Эффект проскальзывания происходит фактически также по криволинейной траектории вращения вихря. На профилях скорости, та-

ким образом, зафиксирована только одна продольная компонента вращения вихря. Такого характера осредненных профилей не было зафиксировано в предыдущих исследованиях (например, см. рис. 1).

Формы пульсационных профилей существенно отличаются от приведенных в других работах и на рис. 6–8. Максимумы пульсационных скоростей увеличились по сравнению с приведенными профилями на рис. 7, 8 на порядок. Эти максимумы (рис. 9) расположены в значительно более широком диапазоне y/δ^* . Так же, как и у осредненных профилей скорости, вблизи уровня пластины распределение пульсационных скоростей по y/δ^* свидетельствует о проскальзывании потока. Увеличение пульсационных скоростей свидетельствует об изменении формы и интенсивности вихревого движения в лунке.

Ниже будут приведены профили скорости при обтекании лунки Л21. Расположение вставки оставалось таким же, как и на рис. 5. При этом вместо лунки Л20 устанавливалась вспомогательная втулка, отверстие в которой было заполнено пластилином заподлицо с поверхностью вставки. Диаметр лунки Л21 составил 18 мм, глубина – 6 мм,

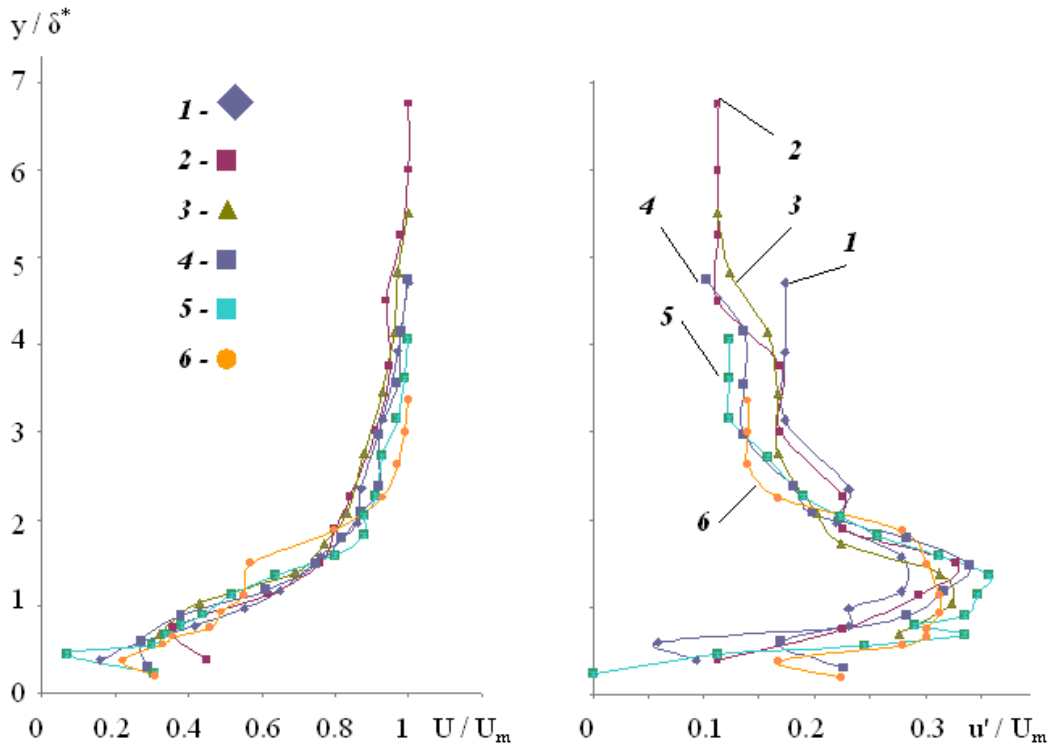


Рис. 9. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л20 при $U_m = 17.5$ см/с

$h/d=0.33$. Безразмерный параметр h/d лунки Л21 занимает промежуточное положение между лункой Л20 ($h/d=27$) и лункой, обтекаемой воздушным потоком ($h/d=45$) [4]. Края лунки Л21 имеют закругления, как и у лунки Л20. При обтекании лунки Л21 измерения профилей скорости проводились вдоль продольной оси симметрии лунки при следующих значениях продольной координаты x . Отсчет координаты x начинался на расстоянии 3 мм перед краем вставки (см. рис. 5). Таким образом, профили скорости были измерены при значениях координаты x : 1 – 0 мм, 2 – 20 мм (край лунки), 3 – 29 мм (центр лунки), 4 – 33 мм, 5 – 38 мм (край лунки и втулки), 6 – 53 мм (ось симметрии вставки). Эти координаты незначительно отличаются от координат, при которых измерялись профили скорости лунки Л20. Так, у лунки Л20 первые измерения проводились на расстоянии 15 мм, а у лунки Л21 – на расстоянии 20 мм до края лунки. Вторые измерения осуществлялись для обеих лунок в районе их переднего края. Третье измерение у лунки Л20 проводилось на расстоянии примерно 1/4 от переднего

края лунки вдоль потока, в то время как у лунки Л21 измерения делались в центре лунки. Четвертое измерение у лунки Л20 проводилось в центре лунки, а у лунки Л21 – в районе 3/4 от переднего края лунки, что соответствует пятому измерению у лунки Л20. Пятое измерение у лунки Л21 проводилось у края лунки и это соответствует 6-му измерению на лунке Л20. Седьмое измерение у лунки Л20 осуществлялось на расстоянии 5 мм вниз по потоку от заднего края лунки. Аналогичное измерение у лунки Л21 проводилось при 6-ом измерении, но на расстоянии 15 мм от заднего края лунки. При сопоставлении результатов, полученных при обтекании этих лунок, надо учитывать указанные отличия в координатах проведенных измерений.

На рис. 10 приведены осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 потоком со скоростью $U_m = 9.76$ см/с. Осредненные продольные профили скорости оказались практически такими же, как и при обтекании лунки Л20 при $U_m = 10.06$ см/с (рис. 6). В то же время, характер профилей пуль-

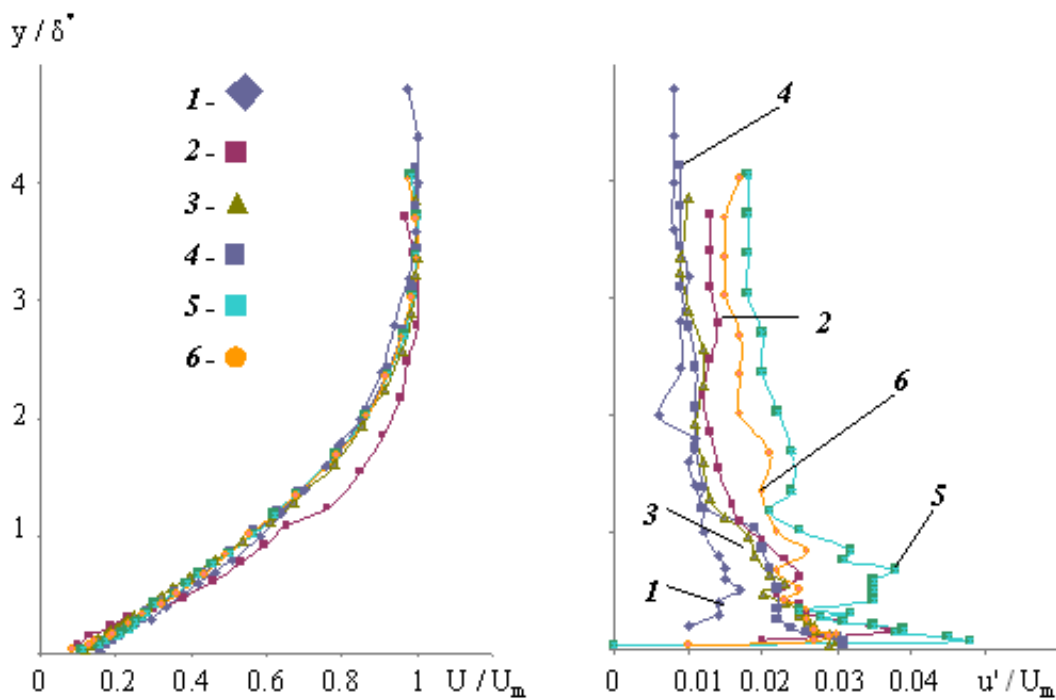


Рис. 10. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при $U_m = 9.76$ см/с

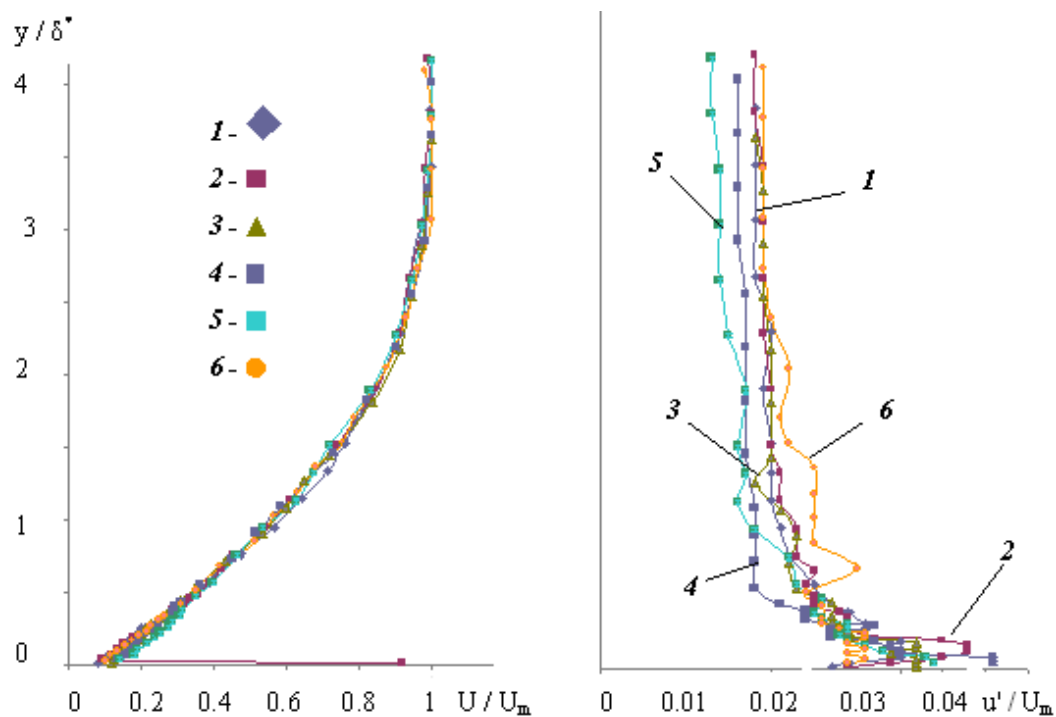


Рис. 11. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при $U_m = 11.3$ см/с

сационных скоростей при обтекании лунки Л21 существенно отличается от характера аналогичных профилей скорости, измеренных при обтекании лунки Л20. Распределение профиля 1 пульсационной скорости (рис. 10) по толщине пограничного слоя практически такое же, как и при обтекании лунки Л20 (рис. 6). Такая форма профиля совпадает с профилем пульсационной скорости при обтекании гладкой плоской пластины [22, 23], характеризующей вихревую структуру ПС на первых двух этапах перехода [25]. При обтекании лунки Л21 величина пульсационных скоростей при этом примерно в 2 раза меньше, чем при обтекании лунки Л20. Это можно объяснить тем, что при обтекании лунки Л20 измерения проводились на большем расстоянии до лунки и числа Re были больше. Измерения над лункой Л21 (рис. 10, кривые 2–4) отличаются от аналогичных измерений над лункой Л20 (рис. 6, кривые 3–5) и свидетельствуют о быстром чередовании этапов перехода – соответствуют третьему и четвертому этапам перехода в ПС плоской пластины [22, 23]. В результате на 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 [22, 23]. Характер пульсационного профиля 6 соответствует турбулентному ПС [22, 23].

На рис. 11 приведены профили скорости при $U_m = 11.3$ см/с. Увеличение скорости обтекания лунки Л21 привело к формированию перед лункой (кривая 1) профиля пульсационной скорости, соответствующего шестому (предтурбулентному) этапу перехода в соответствии с классификацией работ [22, 23]. Кривые 2–5 (измерения над лункой) соответствуют турбулентному ПС, а кривая 6 (течение за лункой) свидетельствует о стабилизации ПС и соответствует течению на шестом этапе перехода при обтекании пластины. Течение в лунке Л21 подобно приведенному в работе [4] и зафиксированному с помощью визуализации обтекания лунки диаметром 20 мм и глубиной 5 мм ($h/d=0.25$) со скоростью 10 см/с. Видеосъемка позволила зафиксировать два веретенообразных вихря, вращающихся навстречу друг другу так, что вдоль продольной оси лунки течение направлено против основного потока. Сравнение результатов, приведенных на рис. 11, с аналогичными измерениями при обтекании лунки Л20 (рис. 7) показало, что картина течения при обтекании лунки Л21 совершенно другая. Это отличие определяется геометрическими параметрами лунок. Диаметр лунки Л21 меньше, а ее глубина больше, чем у лунки Л20. Формы вихрей внутри этих лунок подо-

бны, но интенсивность вихрей различная. Поэтому с ростом скорости не наблюдается увеличения высоты эллиптических вихрей в лунке в такой же мере, как у лунки Л20. Возможно, играет роль и то, что радиус закругления кромок лунки Л21 был меньше. При этой скорости у лунки Л21 не зафиксировано оттеснение потока над лункой. Характер пульсационных профилей – другой.

На рис. 12 приведены профили скорости при $U_m = 12.8$ см/с. Осредненные профили скорости не изменили свой характер с увеличением скорости обтекания лунки Л21. Пульсационные профили скорости при этом существенно изменились: отсутствуют характерные максимумы вблизи нулевой координаты, а увеличивается распределение максимумов по толщине пограничного слоя – до $y/\delta^*=1$. По сравнению с обтеканием лунки Л20 оттеснения потока вверх от уровня пластины не наблюдается. Но характер пульсационных кривых необходимо связывать с распределением пульсаций в вихревых структурах внутри лунки.

На рис. 13, 14 приведены профили скорости при существенном возрастании скорости основного потока – соответственно $U_m = 51.6$ см/с и $U_m = 76$ см/с. На рис. 13 осредненные профили скорости, измеренные до лунки и после, свидетельствуют о турбулентном режиме течения в ПС. Профиль скорости, измеренный за лункой, имеет сильный перегиб, свидетельствующий о выбросах из лунки. Профили скорости, измеренные над лункой, свидетельствуют о том, что интенсивность вихревого движения в лунке возросла. Вследствие этого размеры вихрей увеличились, и их наружная граница выступает за плоскость вставки. Характер пульсационных профилей скорости соответствует характеру турбулентного ПС на жесткой пластине с учетом различия границы: ПС над лункой формируется не над жесткой стенкой, а над движущейся вихревой структурой. Пульсационный профиль скорости, измеренный за лункой, свидетельствует о выбросе жидкости из лунки. Как и при обтекании лунки Л20 (рис. 9), величина пульсационных скоростей увеличилась на порядок, а их максимальные значения расположены по толщине ПС в районе перегиба осредненных скоростей. Это также характеризует резкую смену характера вихревого движения в лунке при увеличении скорости потока. Сравнение особенностей обтекания лунок Л21 при $U_m = 51.6$ см/с и Л20 при $U_m = 17.5$ см/с (рис. 9) показывает, что формы осредненных профилей скорости имеют общие черты, а максимумы пульсационных скоростей расположены в районе $y/\delta^*=1$. Учитывая отмеченные выше геометрические характеристики этих

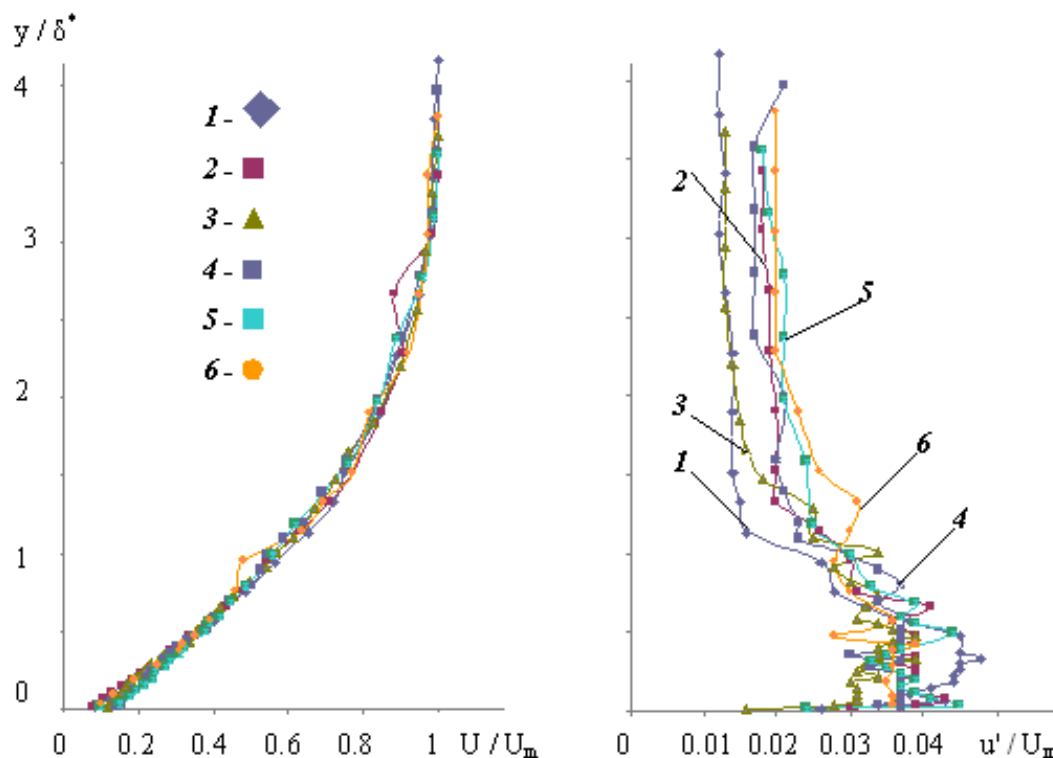


Рис. 12. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при $U_m = 12.8$ см/с

лунок, можно считать, что при указанной скорости в лунке Л21 сформировался один вихрь, вращающийся в лунке.

На рис. 14 приведены профили скоростей при еще большей скорости обтекания лунки Л21 ($U_m = 76$ см/с). Профили осредненных и пульсационных скоростей при обтекании лунки Л21 существенно отличаются от всех профилей скорости, приведенных на рис. 6–13. Подобно обтеканию лунки Л20 ($U_m = 17.5$ см/с рис. 9), интенсивность вращающегося в лунке вихря возрастает, увеличивается размер вихря, и его внешняя граница выступает за контуры лунки: в средней части над лункой до $y/\delta^* = 1$. Вследствие этого, как видно из осредненных профилей скорости, перед лункой (кривая 1) и на переднем краю лунки (кривая 2) происходит также искривление линий тока. За счет этого профили скорости в этих сечениях также имеют перегибы вблизи стенки при $y/\delta^* = 0.4$. Над лункой (кривые 3, 4) и в районе задней кромки лунки (кривая 5) перегибы профилей скорости возрастают и расположены при большем значении $y/\delta^* = 0.9$. За лункой (кривая 6) искривление линий тока постепенно уменьшается так, что перегиб профиля при этой координате x расположен при

меньшем расстоянии от стенки - при $y/\delta^* = 0.6$.

Такая же картина наблюдается и в формах пульсационных профилей скорости. Так, в пульсационных профилях, измеренных перед лункой (кривая 1) и в районе передней кромки лунки (кривая 2), максимумы скорости расположены при y/δ^* , соответствующем области перегиба в осредненных профилях скорости, а величина максимумов составляет $u'/U_m = 0.2$. Над лункой максимальные значения пульсационных скоростей (как и осредненных скоростей) существенно возрастают - до $u'/U_m = 0.35$. За лункой максимум пульсационной скорости уменьшился до $u'/U_m = 0.28$ (кривая 6). Все это также характеризует резкую смену характера вихревого движения в лунке при увеличении скорости потока.

ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных результатов обтекания различных видов круглых лунок позволил сделать следующие выводы:

1. Обтекание круглых лунок водным потоком позволило определить закономерности формирования вихревых структур в лунках при числах

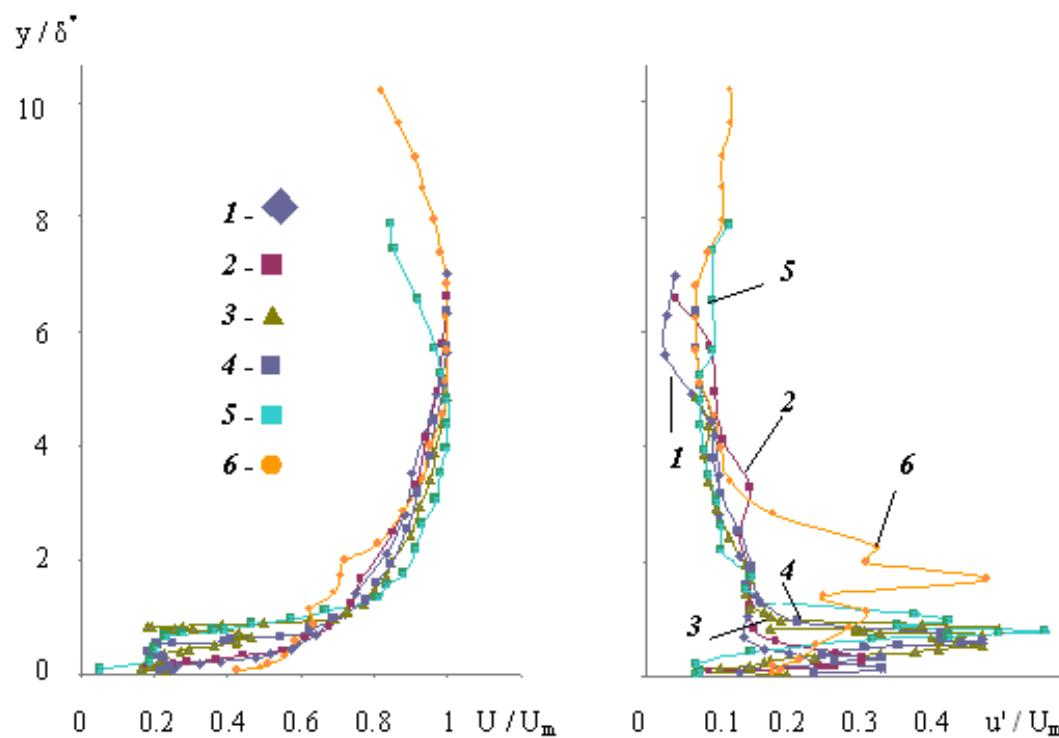


Рис. 13. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при $U_m = 51.6$ см/с

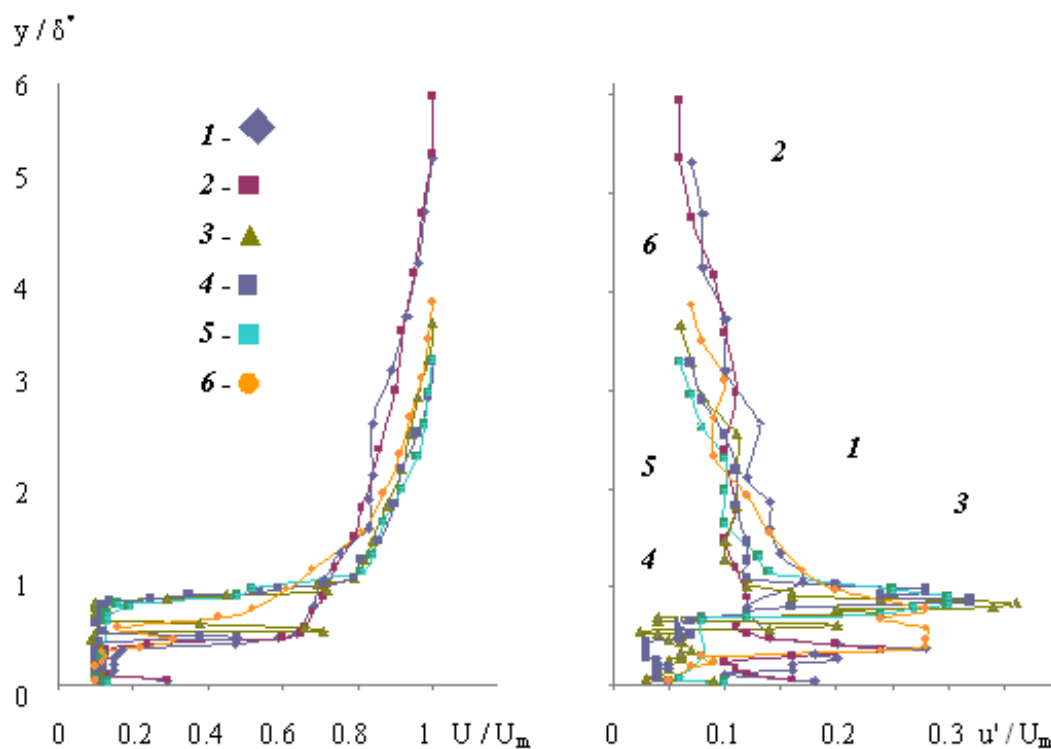


Рис. 14. Осредненные и пульсационные профили продольной скорости при обтекании лунки Л21 при $U_m = 76$ см/с

Re, соответствующих различным этапам переходного ПС на пластине до места расположения лунок. Исследованы две круглые сегментные лунки, имеющие скругленные кромки, – Л20 с параметром $h/d=0.27$ и Л21 с $h/d=0.33$. При скоростях обтекания, приведенных на рис. 6–9, для лунки Л20 числа Re составили $Re_x = 1.36 \cdot 10^5$, $1.4 \cdot 10^5$, $1.75 \cdot 10^5$, $2.28 \cdot 10^5$. Для лунки Л21 для скоростей обтекания, приведенных на рис. 10–12, числа Re того же порядка, что и первые три значения числа Re для Л20. Для скоростей обтекания, приведенных на рис. 13, 14, числа Re составили $6.7 \cdot 10^5$ и $9.8 \cdot 10^5$.

2. При различных геометрических параметрах лунок Л20 и Л21 и небольших числах Re зафиксированы формы профилей скорости, соответствующих различным этапам перехода пограничного слоя, приведенных в [25] при обтекании пластины. С увеличением скорости обтекания зафиксированы формы профилей скорости, свидетельствующие о формировании в лунках пары веретенообразных вихрей. При $Re_x > 2 \cdot 10^5$ зафиксированы формы профилей скорости, свидетельствующие о формировании в лунках одного вихря, вращающегося в лунке поочередно по и против часовой стрелки. С ростом скорости вихревые структуры выступают за уровень лунки. Полученные формы профилей скорости соответствуют визуализационным картинкам, полученным в [4] с помощью фотографирования и съемки на видеокамере. Таким образом, зафиксировано три режима обтекания лунок. При первом режиме обтекания формирование вихревых структур в лунках не оказывает влияние на поток над лункой. Профили скорости над лунками практически подобны профилям скорости при обтекании жесткой пластины. Такой режим обтекания можно условно назвать ламинарным. При втором режиме обтекания в лунках формируется пара веретенообразных вихрей. В зависимости от геометрических параметров лунок при увеличении скорости происходит торможение потока вдоль продольной оси лунки и, в результате, течение над лункой отесняется от горизонтального уровня – происходит искривление линий тока над лункой в области выполненных измерений. Этот режим обтекания можно условно назвать переходным. При третьем режиме в лунке формируется один вихрь, который выступает за наружный контур лунки. Вихрь периодически меняет направление вращения в лунке и периодически выбрасывается из лунки. Течение в лунке и над лункой становится нестационарным. Формы профилей скорости имеют резкий перегиб на внешней границе такого вихря. Этот режим обтекания

можно условно назвать турбулентным.

3. Обнаруженные физические особенности течения внутри полусферических сегментных лунок имеют некоторые особенности, которые зависят от геометрического параметра h/d и естественных когерентных вихревых структур пограничного слоя, зависящих от этапов перехода, формирующихся в пограничном слое перед лунками. Вихревые структуры в лунках влияют на эти КВС пограничного слоя и видоизменяют их над лунками. Степень такого изменения, в свою очередь, зависит от диаметра лунки. В пограничном слое за лункой, в соответствии с [24], вихревые структуры, формирующиеся в лунках и выходящие из них, будут в той или иной степени взаимодействовать с видоизмененными КВС ПС. В связи с этим в дальнейшем целесообразно проводить измерения в лунках и их окрестностях не только вдоль продольной оси, но и при различных расстояниях в трансверсальном направлении.

Авторы приносят глубокую признательность сотрудникам лаборатории теплового моделирования Института физико-технических проблем энергетики Литовской Академии Наук Пядишосу А. А., Зигмантасу Г. П. и Янушасу В. И. за содействие при проведении экспериментальных исследований, а также за предоставление лазерного анемометра и видеокамеры, без которых невозможно провести современные исследования физических процессов сложных течений.

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.– 6–70 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., Милуков Д. Е.* Визуализация обтекания полусферических углублений // Прикладная гидромеханика.– 2010.– 12 (84), № 4.– С. 3–25.
5. *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.
6. *Волчков Э. П., Калинина С. В., Матрохин И. И. и др.* Некоторые результаты экспериментального исследования аэродинамики и теплообмена на поверхности с полусферическими кавернами // Си-

- бирский физико-технический журнал.– 1992.– 5.– С. 3–9.
7. 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.
 8. Афанасьев В. Н., Леонтьев А. И., Чудновский Я. П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями.– М.: МГТУ, 1990.– 118 с.
 9. Афанасьев В. Н., Веселкин В. Ю., Леонтьев А. И. и др. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности.– М.: МГТУ: 1991, ч. I: 56с.– ч. II: 139с с.
 10. Афанасьев В. Н., Веселкин В. Ю., Скибин А. П., Чудновский Я. П. Экспериментальные исследования течения в одиночных выемках на исходно гладкой поверхности теплообмена // II Минский международный форум Теплообмен, ММФ–92, т. I.– Минск: ИТМО АН Беларуси, 1992.– С. 81–85.
 11. Мусиенко В. П. О формировании волн Толлмина–Шлихтинга механическим вибратором // Бионика.– 1992.– Вып. 25.– С. 50–53.
 12. Мусиенко В. П. Экспериментальное исследование обтекания локализованных углублений // Бионика.– 1993.– Вып. 26.– С. 31–34.
 13. Babenko V. V., Musienko V. P., Korobov V. I. Experimental investigation of spherical groove influence on the intensification on heat and mass transfer in the boundary layer // Euromech Colloquium 327 Effects of organized vortex motion on heat and mass transfer.– Kiev, Ukraine, August 25–27.– P. 1994.
 14. Babenko V. V., Musienko V. P., Korobov V. I. Formation of vortex structure on curvilinear surfaces and semi-spherical cavities 11–th Int. Couette-Taylor Workshop // Bremen, Germany.– 1999.– 103
 15. Бабенко В. В., Мусиенко В. П., Коробов В. И., Пядишос А. А. Выбор геометрических параметров лунки, генерирующей возмущения в пограничном слое // Бионика.– 1998.– Вып. 27–28.– С. 42–47.
 16. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акустический вестник.– 2007.– N4.– С. 36–46.
 17. Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихревое движение в полукруглой лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вестник национального технического университета Украины КПИ, Машиностроение.– 2006.– Вып. 48.– С. 79–85.
 18. Babenko V. V., Voskoboinick A. V., Voskoboinick V. A., Turick V. N. Vortex formation in the hemispherical cavity on the surface of streamlined plate // Pros. Vth Intern. Conf. Promyshlennaya teplotehnika.– Kiev, Ukraine, 2007.– P. 29–30.
 19. Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Частотно-волновые характеристики когерентных вихревых структур в трехмерном углублении // Промышленная гидравлика и пневматика.– 2009.– N 1(23).– С. 21–28.
 20. Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Турик В. Н., Воскобойник А. В. Генерация вихрей в локальных углублениях // Вісник Донецького національного університету, Сер. А: Природничі науки.– 2009.– N 2.– С. 33–40.
 21. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.– К.: Наукова думка, 1978.– 184 с.
 22. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В., Цыганюк А. И. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– К.: Наукова думка, 1985.– 283 с.
 23. 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.
 24. Бабенко В. В. Проблема восприимчивости пограничным слоем различных возмущений // Бионика.– 1988.– Вып. 22.– С. 15–23.
 25. Бабенко В. В., Abbas F. Mahmood, Гни-тецкий Н. А. Взаимодействие пограничного слоя с трехмерными возмущениями // Прикладная гидромеханика.– 2011.– 13 (85), № 3.– С. 3–22.