

УДК 532.57 532.517 536.53 533.6

ВИЗУАЛИЗАЦІЯ ОБТЕКАННЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ УГЛУБЛЕНИЙ

В. В. БАБЕНКО, В. П. МУСИЕНКО*, В. Н. ТУРИК, Д. Е. МИЛЮКОВ**

* *Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

** *Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев*

Получено 12.05.2010

Представлены новые результаты экспериментальных исследований обтекания трехмерных углублений, выполненных в виде сферических сегментов различного диаметра и глубины. Эксперименты проведены в замкнутой гидродинамической трубе с помощью специальных приспособлений. Разработана методика, заключающаяся в предварительной визуализации структуры потока и дальнейшем измерении лазерным анемометром в обнаруженных характерных местах зафиксированных вихревых структур. Результаты визуализации зафиксированы с помощью фотоаппаратов и видеокамеры. Обнаружены новые вихревые структуры в трехмерных углублениях и закономерности их развития в зависимости от скорости обтекания и геометрических параметров лунок.

Наведені нові результати експериментальних дослідів обтікання тримірних заглиблень, виконаних у вигляді сферичних сегментів різного діаметру та глибини. Експерименти проведені у замкненій гідродинамічній трубі за допомогою спеціальних застосувань. Розроблена методика, що містить попередню візуалізацію структури течії та подальші виміри лазерним анемометром у винайдених характерних місцях зафіксованих вихрових структур. Результати візуалізації зафіксовані за допомогою фотоапаратів та відеокамери. Знайдені нові вихрові структури в тримірних заглибленнях та закономірності їхнього розвитку в залежності від швидкості обтічного потоку та геометричних параметрів лунок.

New results of experimental researches of a flow of the three-dimensional cavities executed as spherical segments of various diameter and depth are submitted. Experiments are carried out in the closed hydrodynamical tunnel by means of special adaptations. The technique consisting in preliminary visualization of flow structure and the further measurement by laser anemometer in found out characteristic places of fixed vortical structures is developed. Results of visualization are fixed by means of cameras and a video camera. New vortical structures in three-dimensional cavities and laws of their development are found out depending on speed of a flow and holes geometrical parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обтекания различных углублений возникла прежде всего из практических соображений, в судостроении и авиастроении. Необходимо было исследовать различного вида шероховатости на корпусе судов, возникающих вследствие существующих технологий изготовления судов. Наиболее полные сведения об этом имеются в книге Зигхарда Хоернера [1]. Данные по влиянию выступов и впадин на сопротивление, приведенные в [1], основаны, в частности, на исследованиях Вигхардта [2] и Тиллмана [3]. Вигхардт опубликовал результаты исследования различных элементов шероховатости, расположенных на гладкой пластине. Измерения проводились в Геттингенском институте в аэродинамической трубе.

Исследован, в частности, широкий класс двумерных прямоугольных углублений, у которых варьировалась глубина h и ширина e . Для глубоких углублений параметром было отношение h/e , а для мелких углублений – e/h . Впервые изучены методы управления вихреобразованием в двумерных углублениях путем установки на передней и задней торцевой стенках углублений тонких пластинок, расположенных параллельно потоку или

под углом наклона к потоку. Кроме того, пластинка, установленная на заднем торце углубления параллельно потоку, была проницаемой. Изучалось также влияние на сопротивление углублений, у которых сопряжение поверхности заднего торца с обтекаемой пластиной было выполнено с различными радиусами кривизны. Исследованы также трехмерные углубления цилиндрической формы. В этом случае вместо ширины углубления e использовался диаметр цилиндрического углубления d . Варьировались диаметр и глубина углубления. Нижняя стенка углубления была параллельна обтекаемой пластине или выполнена наклонной так, что отсутствовала задняя торцевая поверхность углубления в районе продольной оси углубления. Обнаружено, что повышение сопротивления тем меньше, чем меньше отношение глубины h к δ .

Влияние различных углублений на сопротивление в интересах судостроения исследовано также в [4, 5]. Рассматриваются методы расчета дополнительного сопротивления при обтекании различных видов углублений, в частности, приведенных в [2, 3] с учетом указанных выше методов управления сопротивлением. В [6] исследовано обтекание различных видов углублений, применяемых в

авиастроении. Приводятся результаты измерения распределение давления на стенках углублений, а также влияние углублений на местное сопротивление и распределение давления при дозвуковом и сверхзвуковом обтекании различных типов аппаратов. Анализируются некоторые вопросы излучения звука при обтекании углублений. Возможность генерирования звука при обтекании углублений рассмотрена также в [7, 8 и др.].

Исследование обтекания различных углублений имеет большое практическое значение для проблемы *тепломассопереноса*. Пресснер впервые предложил полуэмпирическую теорию расчета конвективного теплопереноса при течении воздуха в канале над местными углублениями, имеющими различную форму [9]. Всего было исследовано 109 типов углублений в виде полусферы, цилиндров, конусов, усеченных конусов, призм с квадратным и треугольным сечениями, пирамид с квадратным и треугольным сечениями, усеченных пирамид и др. Отмечено, что на характер течения в углублении влияют величина *скорости* основного потока и ее *колебания*. Определяющим для процесса теплопереноса является поверхность разрыва вблизи задней кромки. В работе Пресснера измерения проводились по оси симметрии трехмерного углубления, поэтому не учитывалось влияние боковых стенок углубления на характер течения в углублении.

Большое количество исследований посвящено обтеканию *полусферических углублений*. Р. Сидекер и К. Дональдсон рассмотрели формирование вихря в полусферическом углублении при обтекании его в аэродинамической трубе в диапазоне скоростей $15 \div 66$ м/с [10]. Было обнаружено, что ось вихря сильно наклонена к направлению набегающего потока. Наклонное положение оси вихря может быть изменено на симметрично противоположное по отношению к оси трубы. Отклонение вихря осуществлялось путем установки на дне лунки маленькой направляющей лопатки. Было установлено, что причина наклона оси вихря заключается в воздействии радиального градиента давления на стенке лунки в точках касания вихря. Вследствие этого воздействия радиальная составляющая течения направлена вдоль стенки к оси вихря. А так как втекающая жидкость не может скапливаться в местах касания вихря, не приводя к нестационарным явлениям в структуре потока, то точка касания одного из концов оси вихря перемещается в область, где окружающее давление ниже, чем на другом конце оси. Таким образом, устанавливается стационарное осевое течение, переносящее жидкость, "скопившуюся" на том конце оси

вихря, который расположен в области повышенного давления. В рассмотренном случае область низкого давления, играющая роль стока, обнаружена вблизи края отверстия в стороне от продольной оси и несколько ниже по потоку от центра отверстия.

Исследования при обтекании полусферического углубления (лунки) были выполнены в Новосибирске в Институте теплофизики СО АН СССР [11, 12]. Рассматривалось течение в плоском канале над одиночной и системой лунок, а также обтекание в канале в продольном направлении одиночного цилиндра и пучков цилиндров. Углубления были в виде сегментов сферы диаметром $(1.8 \div 6.0) \cdot 10^{-3}$ м и глубиной $(0.3 \div 0.5) \cdot 10^{-3}$ м. При обтекании лунки водой визуализация осуществлялась с помощью пузырьков воздуха, а воздухом – с помощью дыма. Регистрация вихревых структур в лунках выполнялась с помощью видеоматрицы. Распределение давления на поверхности углубления измерялось в потоке воды путем измерения перепада давления между выбранной точкой на гладкой поверхности канала и каждого из 25 отверстий диаметром $0.3 \cdot 10^{-3}$ м, изготовленных в районе лунки. Распределение скорости жидкости было измерено с помощью лазерного доплеровского анемометра. Гидравлическое сопротивление определялось путем измерения перепада давления между входом и выходом в канале.

В этих работах получены подробные результаты измерений распределения давления в лунке и теплопередачи в канале, а также качественные картины визуализации течения, так как визуализация в водном потоке с помощью воздушных пузырьков не позволяет получить правильные картины течения. В том же институте выполнено измерение продольных осредненных и пульсационных скоростей с помощью двухкомпонентного лазерного анемометра [13, 14]. Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде с рабочим участком в виде канала с прямоугольным сечением 0.015×0.115 м. Лунка располагалась на расстоянии 0.66 м от входа в канал, который непосредственно присоединялся к баку с дистиллированной водой. Отсутствие конфузора не позволяло получить качественный поток в канале. Радиус сферы лунки был 0.028 м, глубина сегмента – 0.012 м, а диаметр сегмента – 0.046 м. Такие размеры углубления были большими по сравнению с размерами канала. Скорость потока была 1.42 м/с.

Распределение давления измерялось вдоль продольной осевой линии канала через отверстия диаметром $5 \cdot 10^{-4}$ м. Визуализация осуществлялась с помощью лазерного ножа и применения алю-

миниевой пудры, методом водородных пузырьков, а также путем выдува воздуха или подкрашенной жидкости через отверстия для отбора давления. При визуализации скорость потока была 0.2 м/с. Полученные в работе результаты визуализации носят качественный характер. Измерения с помощью лазерного анемометра позволили обнаружить пик давления на задней кромке лунки. Измерены профили скорости вблизи лунки, вдоль ее осевой линии и в *трансверсальном* направлении. Высказана гипотеза, что в результате искривления линий тока при обтекании лунки могут формироваться вихри типа *гертлеровских*. По результатам измерения профилей скорости вычислены коэффициенты трения, которые при обтекании лунки оказались в 2 раза выше, чем на гладкой пластине, но на расстоянии двух калибров лунки за ней – на 20% меньше, чем при отсутствии лунки.

Измерения кинематических характеристик пограничного слоя при обтекании одиночной лунки и системы сферических лунок осуществлено в МГУ [15–17]. В этих работах выполнены систематические исследования характеристик пограничного слоя при обтекании лунок. Измерения проводились на дне аэродинамического стенда, рабочая часть которого имела размеры $0.08 \times 0.3 \times 1.11$ м. Диапазон рабочих скоростей был $0 \div 20$ м/с. Хотя стенд был оснащен конфузуром, диффузором и хоннейкомбом, конструкция стенда не позволяла получать устойчивое поле скоростей. Поэтому полученные результаты носят качественный характер. Радиус лунки был $7.65 \cdot 10^{-3}$ м и $13.32 \cdot 10^{-3}$ м, а диаметр сегмента соответственно $4.5 \cdot 10^{-3}$ м и $7.5 \cdot 10^{-3}$ м. Температуру и скорость измеряли с помощью микрозонда в виде трубки Пито-Прандтля, а также с помощью термоанемометра DISA-55. Трение и теплообмен были измерены в продольном и поперечном направлениях по осям лунки. Получено распределение в этих направлениях коэффициента трения и теплообмена. Важным является то, что при увеличении теплообмена на поверхностное трение не возрастает, а в некоторых случаях и уменьшается (до 5%). Аналогичные измерения были выполнены в аэродинамической трубе с рабочим участком 0.202×0.402 м, на нижней стенке которого была установлена модель полусферического углубления диаметром 0.15 м [18]. Скорость потока варьировалась в пределах $18.5 \div 33.6$ м/с. Степень турбулентности потока изменялась и при измерениях была 0.5% и в диапазоне ($7.2 \div 22$)%. Измерения выполнялись с помощью термоанемометра. Визуализация осуществлялась с помощью дыма. Измерены профили скорости вдоль лунки, линии тока и трение в лун-

ке, а также коэффициенты теплоотдачи. Получено уточнение картины течения потока. Отмечено, что физика течения при обтекании лунки остается невыясненной.

В работах [19–21] исследуется внешняя задача обтекания поверхностей, на которых расположены системы лунок. В монографиях А. А. Халатова выполнен обзор многочисленных отечественных и зарубежных исследований обтекания полусферических лунок, приведены результаты применения поверхностей с лунками для различных технологий в машиностроении [22–24].

В. В. Бабенко и В. П. Мусиенко с 1989 г. начали проводить в Институте гидромеханики НАНУ (Киев) исследование обтекания углублений водным потоком. Визуализация потока при проведении экспериментальных исследований в водном потоке показала, что в зависимости от скорости потока лунка генерирует в пограничный слой 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 [25]. Центр лунки соединялся со штоком, который с помощью механической системы 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 [25] 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 [26, 27] приводятся результаты исследования обтекания полусферической лунки водным потоком. Приводятся картины визуализации обтекания лунок различной формы (круглой, эллиптической и полукруглой в плоскости обтекаемой пластины), выполненные с помощью струек различного цвета. При обтекании круглой лунки осуществлены измерения продольного осредненного профиля скорости с помощью лазерного анемоме-

тра. 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 [28, 29] приводятся результаты измерения профилей продольной и пульсационных скоростей при обтекании круглой лунки в водном потоке. Диаметр лунки составлял $d = 2.6 \cdot 10^{-2}$ м, глубина лунки $h = 0.7 \cdot 10^{-2}$ м, а скорости потока, измеренные с помощью лазерного анемометра, составляли: $U_{\infty} = 5.86 \cdot 10^{-2}$; $8.15 \cdot 10^{-2}$; $10.06 \cdot 10^{-2}$; $11 \cdot 10^{-2}$; $13.6 \cdot 10^{-2}$; $17.5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Показано, что в зависимости от скорости потока форма профилей скорости и их развитие вдоль лунки существенно изменяются. Как и в [14], измерены характеристики потока вдоль лунки на различных расстояниях в *трансверсальном* направлении. В [30] 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 проводят экспериментальные исследования кинематических характеристик пограничного слоя над пластиной с полусферической лункой при обтекании ее воздухом. В [8, 31–33] 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 [25–30] заключались в том, что измерения проводились в лунке, глубина которой равнялась радиусу диаметрального сечения лунки, при этом числа Рейнольдса возросли.

Анализ указанных исследований показывает, что в настоящее время еще не имеется четкого представления о характере течения потока над гладкой поверхностью с лункой. За исключением [14, 28 и 29], все измерения выполнены в вертикальной плоскости вдоль продольной оси симметрии лунок. Визуализация показала, что в лунках наблюдается пространственная картина вихревых течений, существенно зависящих от скорости основного потока. Не имеется физической картины течения в лунке на основе современных представлений о когерентных вихревых структурах пограничного слоя. Не анализируется взаимо-

действие когерентных вихревых структур пограничного слоя, существующих вблизи лунки, с генерируемыми лункой вихревыми структурами. Не выработаны критериальные параметры при обтекании лунок в зависимости от особенностей течения потока над лункой.

На основании анализа описанных исследований была разработана следующая программа проведения экспериментальных исследований обтекания трехмерных углублений.

А. Исследование лунки:

- простая симметричная круглая лунка;
- простая несимметричная круглая лунка;
- две симметричные круглые лунки;
- эллиптическая лунка;
- эллиптическая несимметричная лунка, ось которой расположена под углом к набегающему потоку;
- две эллиптические лунки.

Б. Исследование проблемы генерирования вертикальных вихрей:

- одиночного вихря;
- пары вихрей.

В. Эффекты взаимодействия лунок:

- с различными генераторами продольных вихрей;
- с препятствиями.

Г. Активная и адаптивная лунка:

- симметричная лунка;
- комбинация активной и пассивной лунок;
- с системой обратной связи.

Д. Исследование лунок различной формы.

1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБТЕКАНИЯ ЛУНОК

В настоящее время исследована закономерность чередования когерентных вихревых структур (КВС) в переходном [34] и турбулентном [35] пограничных слоях при обтекании плоской пластины. Изучение закономерностей их формирования и чередования позволили выдвинуть гипотезу, что при правильном управлении этими когерентными вихревыми структурами можно регулировать как величину гидродинамического сопротивления, так и интенсивность тепломассопереноса. Это обусловило развитие нового направления – управления КВС пограничного слоя. При этом достаточно воздействовать не на весь пограничный слой, а на небольшую его область, в которой формируются когерентные вихревые возмущения. Это означает, что необходимо воздействовать только на возмущающее движение, интенсивность которого на порядок меньше по сравнению с интегральными ха-

рактическими пограничного слоя. Поэтому методы управления КВС пограничного слоя приводят к положительным результатам, при значительно меньших затратах энергии по сравнению с традиционными методами управления пограничным слоем.

В реальных условиях на пограничный слой с внешних его границ действуют различного вида и интенсивности возмущения, вызванные, например, вибрациями обтекаемой поверхности, ее волнистостью и различного рода неровностями, а также турбулентностью внешнего потока или нестационарностью обтекания. Все это приводит к тому, что на упорядоченные вихревые структуры пограничного слоя, формирующиеся в пограничном слое вследствие физических закономерностей сдвигового течения, накладываются КВС, вызванные указанными внешними возмущающими факторами. Таким образом, продвижение и успех в области управления КВС пограничного слоя будет обусловлен результатами изучения как закономерностей формирования вихревых структур возмущающего движения пограничного слоя, так и закономерностей взаимодействия в пограничном слое различного рода плоских и трехмерных возмущающих движений.

Были выполнены экспериментальные исследования развития возмущающего движения на различных этапах развития переходного пограничного слоя. На основании полученных данных был разработан макет развития КВС в переходном пограничном слое [34]. Развитие возмущающего движения в переходном пограничном слое при низкой степени турбулентности можно разделить на восемь этапов, на каждом из которых выделяется наиболее характерная специфическая структура КВС [34, 36, 37]. В настоящее время выполнено большое количество экспериментальных исследований турбулентного пограничного слоя. Клайн [35] и Менг [38] обобщили полученные данные и охарактеризовали восемь типов КВС в турбулентном пограничном слое.

Для проведения настоящих исследований и анализа полученных результатов использованы два основных положения. Первое из них состоит в том, что в 1980 г. нами была выдвинута гипотеза: в вязком подслое турбулентного пограничного слоя развитие КВС происходит примерно так же, как и в переходном пограничном слое, но при воздействии ухудшающих факторов [39]. Позже такую же аналогию предложил Блэквелдер [40]. Второе положение заключается в применении результатов исследования проблемы восприимчивости пограничным слоем различных возмущений

[37, 39, 41]. Понятие восприимчивости включает процесс взаимодействия в пограничном слое различных вносимых извне возмущений с естественными характерными КВС пограничного слоя и результат такого взаимодействия. Пограничный слой можно представить как динамическую систему, обладающую спектром собственных частот, реагирующую на вносимые возмущения в зависимости от резонанса и структуры вносимых и собственных возмущений. Такое взаимодействие удобно представить следующим образом. Необходимо изучить структуру и характер развития возмущающего движения в пограничном слое в отсутствие каких-либо внешних воздействий или при слабом воздействии, а затем проследить, как изменяется процесс развития возмущений в пограничном слое по мере внесения разного рода малых и конечных внешних возмущений.

Изучение характера развития перехода пограничного слоя при воздействии на каждом этапе перехода конечного плоского или трехмерного возмущения позволили сделать два основных вывода. Во-первых, процесс взаимодействия в пограничном слое можно представить как взаимодействие вносимых возмущений с "замороженными", так называемыми естественными структурами возмущающего движения на каждом этапе перехода (при "отсутствии" внешних возмущений). Во-вторых, взаимодействие естественных структур возмущающего движения пограничного слоя с вносимыми извне возмущениями носит резонансный характер в зависимости от вида их структур, интенсивности и амплитудно-частотно-волновых характеристик.

Таким образом, при исследовании закономерностей обтекания различных углублений необходимо учитывать, какие виды КВС существуют перед и в области расположения углублений при фиксированных числах Рейнольдса. Существующие при этих параметрах течения в пограничном слое КВС перед местом расположения углубления будут оказывать влияние на закономерности течения в углублениях. Сформировавшиеся в углублениях КВС будут взаимодействовать с КВС пограничного слоя, сформировавшиеся за местом расположения углубления при условии его отсутствия.

2. ОСНОВНЫЕ БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В соответствии с теорией подобия существуют геометрические, кинематические, динамические и термодинамические критерии подобия. Как показано в разделе 1, основными геометрическими па-

раметрами при обтекании лунок являются глубина h и диаметр углубления d , а безразмерным параметром служит отношение h/d . Иногда применяют параметр h/δ , где δ – толщина пограничного слоя. В качестве кинематического параметра используют число Рейнольдса, вычисленное по диаметру или глубине лунки. В [24] приведена систематизация результатов обтекания полусферических углублений, полученных различными авторами. В зависимости от скорости потока различают три типа обтекания лунки. Первый наблюдается при малых скоростях потока – так называемый диффузно-конфузорный тип. С ростом скорости формируется второй тип обтекания лунки, когда в лунке формируется подковообразный вихрь, концы которого присоединены к стенкам лунки. При дальнейшем увеличении скорости один конец этого вихря отрывается и уносится в направлении потока. В [24] приведены статистические зависимости величин h/d от чисел Рейнольдса Re_d или Re_h . Выполненные экспериментальные исследования показали, что в зависимости от скорости обтекания вихревые системы, формирующиеся в лунке, могут либо стабилизировать КВС в пограничном слое за лункой, либо резонансно увеличивать его завихренность. Несмотря на накопленные данные, остается невыясненным, каким образом можно определить геометрию лунок для указанных видов влияния лунок на пограничный слой.

Известно, что начало перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный пограничный слой связано с возникновением волн Толлмина–Шлихтинга и характеризуется числом Re потери устойчивости. Колебательный квазисинусоидальный процесс развития этих волн в дальнейшем будет развиваться в зависимости от вида возмущений, энергии, частотного диапазона, места возникновения возмущающего движения по x и y , скорости основного потока, степени турбулентности и т. д. Достаточно полно картина перехода пограничного слоя на плоской пластине приведена в [36, 37]. По визуальным наблюдениям и на основе измерений характеристик пограничного слоя построен макет развития возмущений при переходе ламинарного пограничного слоя в турбулентный пограничный слой. При постоянной скорости обтекания пластины и при данных условиях течения этапы перехода как бы замораживаются вдоль оси OX (по направлению потока). Таким образом, зная скорость внешнего потока и место наблюдения по оси OX , можно определить, какой этап перехода и характерная вихревая структура имеют место в районе расположения лунки.

Следует отметить, что лунка ввиду своей геометрии может быть источником как плоских, так и трехмерных возмущений в зависимости от указанных выше режимов обтекания. В работах [34, 37] показано, что с помощью локальной кривизны, например за счет изгиба линий тока волны Толлмина–Шлихтинга или из-за кривизны мелкой выемки, могут возникать предпосылки для возникновения гертлеровской неустойчивости, согласно которой течение становится неустойчивым при

$$\frac{r}{\delta^{**}} \leq \frac{U_{\infty} \delta^{**}}{\nu}.$$

Здесь r – радиус кривизны; U_{∞} – скорость невозмущенного потока; δ^{**} – толщина потери импульса; ν – коэффициент кинематической вязкости. Выбор значения числа Гертлера

$$\frac{U_{\infty} \delta^{**}}{\nu},$$

по которому определяется параметр

$$\frac{r}{\delta^{**}},$$

проводится на основании данных, приведенных в [37]. Если продольный размер выемки пропорционален толщине пограничного слоя δ , то на основании данных [37, 40] можно записать соотношение

$$\frac{1}{r} = \frac{h}{\delta^2}.$$

Для пограничного слоя с профилем Блазиуса при $Re_{\delta^{**}} = 400$ $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м.

На рисунках, приведенных в [30], показана картина обтекания лунки при скорости $U_{\infty} = 1.2 \cdot 10^{-2}$ м/с. Искривления линий тока видны в двух плоскостях XOZ и XOY . Они как бы повторяют форму лунки. Причем, в плоскости XOY искривления заметны по всей толщине пограничного слоя, а в плоскости XOZ линии тока отклоняются не более, чем на 10% (по диаметру лунки) от первоначального направления. Искривление линии тока в плоскости XOZ почти симметричное, а амплитуда искривления зависит от величины y , при которой проводится визуализация, и скорости потока U_{∞} . Искривление линии тока в плоскости XOY несимметричное и тем больше, чем меньше y . По утолщению линии тока видно, что струйка начинает закручиваться в продольном направлении. Видно, что в результате инерционности влияние кривизны лунки на течение в окрестности лунки сказывается не сразу. Поэтому искривление линии тока над лункой не эквивалентно радиусу кривизны лунки. Так как лунка

круглая, то в плоскости XOZ при $y = \text{const}$ амплитуда искривления линия тока будет разная в зависимости от координаты z (ось OX направлена вдоль продольной оси симметрии лунки). Это приведет к появлению волны в направлении OZ и к закручиванию линий тока в продольные вихри. Кроме того, за счет инерционности потока в районе ближнего края лунки образуются заторможенная область, в которой формируется эллиптический вихрь внутри лунки. Интенсивность вихря зависит от величины U_∞ . При малых значениях U_∞ вихрь не влияет на структуру течения над лункой. С ростом скорости лунка начинает более интенсивно влиять на возмущающее движение в пограничном слое. Вследствие этого возрастает продольная завихренность периферийных линий тока и возникают колебания линий тока в поперечном и трансверсальном направлениях. При этом $\lambda_x \sim \lambda_z$, где λ_z – длина волны вдоль оси OZ . Эллиптический вихрь начинает вытягиваться по периферии вдоль лунки симметрично или поочередно, затем вихрь смещается снова к продольной оси лунки, вдоль которой происходит периодический выброс вихря из лунки. Длина волны выброса при этом примерно в два раза меньше λ_x периферийных линий тока. Зная местную скорость пограничного слоя, легко определить частоту выброса вихря из лунки. При дальнейшем возрастании U_∞ эллиптический вихрь деформируется в П-образный [30]. В этом случае выбросы вихря из лунки будут происходить не по оси лунки, а по ее периферии, поочередно с обеих сторон. При этом лунка генерирует устойчивые продольные вихревые системы, λ_x которых несколько меньше диаметра лунки [30].

Лунка обладает универсальным свойством генерировать различные виды возмущений в зависимости от скорости U_∞ . При малой скорости потока лунка может генерировать волновые возмущения, которые будут взаимодействовать с волновыми возмущениями пограничного слоя типа волн Толлмина–Шлихтинга (начальные I–II этапы перехода) [37]. При росте скорости лунка генерирует трехмерные волновые возмущения, которые могут взаимодействовать с нелинейными трехмерными волновыми возмущениями пограничного слоя (III–IV этапы перехода) [37]. При дальнейшем росте скорости лунка генерирует пару продольных вихрей, которые будут взаимодействовать с вихревыми возмущениями пограничного слоя типа вихрей Бенни–Линя (V–VI этапы перехода) [37]. Эксперименты показали, что лунка при определенных условиях может генерировать устойчивые вертикальные "торнадоподобные" вихри, которые

могут взаимодействовать с вертикальными вихрями пограничного слоя на VII предтурбулентном этапе перехода [37].

При соответствующем подборе геометрических параметров лунка будет генерировать возмущения, которые могут взаимодействовать с возмущающим движением в пристеночной области турбулентного пограничного слоя по схеме, рассмотренной выше. Геометрические параметры лунки (глубина, продольный и поперечный размеры) должны быть скоррелированы с характеристиками λ_x и λ_z того этапа перехода, который "заморожен" в районе места расположения центра лунки, и видом вихревой системы, присущей для данного места при определенной скорости потока. В [37] представлены зависимости $\lambda_x = f(\text{Re})$ и $\lambda_z = \phi(\text{Re})$, которые следует учитывать при определенных условиях течения при выборе размеров лунки.

Для задач внешнего обтекания можно использовать характерные параметры δ , δ^* , δ^{**} , где δ^{**} – толщина вытеснения. Исходя из результатов наладочных испытаний, можно заключить, что воздействие лунки проявляется (без существенного повышения сопротивления) при $h \leq \delta^*$.

Динамический параметр лунки можно определить с помощью безразмерного параметра

$$L = T \frac{U_\infty}{2\pi h},$$

где T – период выбросов вихрей из лунки, а $f = 1/T$ – частота выбросов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в Институте физико-технических проблем энергетики Литовской Академии наук при поддержке А. А. Пядишуса. Экспериментальные исследования обтекания трехмерных круглых лунок выполнены в замкнутой гидродинамической трубе. Рабочий участок изготовлен из оргстекла, его длина – 1.0 м, а поперечное сечение – 0.2×0.02 м (рис. 1).

Вода в контур подавалась из бака-наполнителя с системой охлаждения насосом мощностью 2 кВт. Регулировка подачи осуществлялась плавно заслонкой в диапазоне от 0 до 5 м/с. Расход измерялся расходомером ТДР8-1-1 с основной приведенной погрешностью $\epsilon = 0.5\%$. Для более грубой регулировки подачи воды использовалась задвижка при входе в бак-накопитель из обратного контура. С ее помощью в канале поддерживалось постоянное давление. Вход и выход рабочего участка

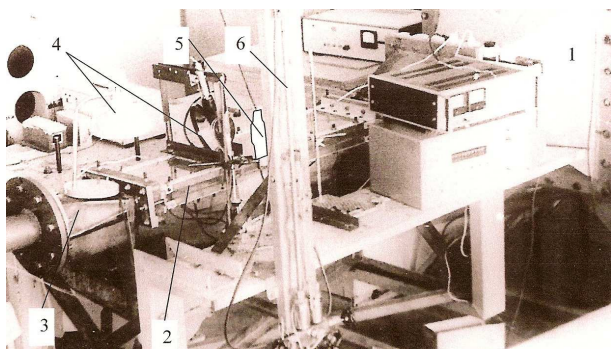


Рис. 1. Общий вид гидродинамической трубы: 1 – конфузор; 2 – рабочий участок; 3 – диффузор; 4 – лампы подсветки; 5 – баллон с цветной жидкостью; 6 – микроманометр

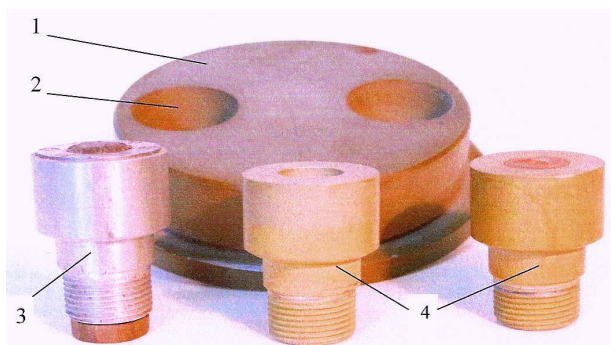


Рис. 2. Вставка для размещения различных углублений: 1 – круглая вставка; 2 – отверстия для размещения втулок; 3 – втулка с регулируемой геометрией лунки; 4 – втулки для формирования различных углублений

для уменьшения турбулентности были тщательно состыкованы с диффузором и конфузором. На дне рабочего участка имелся прямоугольный вырез, в котором устанавливалась гладкая пластина заподлицо с дном. Гладкая прямоугольная пластина имела отверстие диаметром 0.1 м для установки круглой вставки, в которой имелись также два отверстия для установки двух втулок с исследуемыми формами лунок (рис. 2). Диаметр втулок составлял 0.03 м. Круглая вставка могла поворачиваться вокруг своей вертикальной оси симметрии и устанавливаться под разными углами в горизонтальной плоскости по отношению к набегающему потоку и, таким образом, изменялось расположение лунок относительно направления основного потока. Это позволяло визуализировать обтекание одновременно либо двух лунок, либо их взаимодействие. Для исследования влияния изменения геометрии лунки использовалась специальная конструкция с гибкой мембраной, связанной

штоком с валом шагового двигателя с электронной системой управления [25] (см. рис. 2, поз. 3).

Визуализация проводилась с помощью подкрашенных струек. Для получения струек краски с удельным весом, сравнимым с удельным весом воды, использовались красители на основе pH-индикаторов: метиловый фиолетовый и метиловый красный. Струйка красного цвета подавалась по оси рабочего участка с помощью трубки диаметром $0.8 \cdot 10^{-3}$ м, 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, и позволяли визуализировать картину течения в лунке.

Процесс обтекания, визуализированный красками, регистрировался видеокамерой и с помощью фотоаппаратов "Зенит" с переходными кольцами №1 или №2 и "ЛОМО" при съемке динамических процессов на высокочувствительную пленку РФ-3 (350 единиц). В фотоаппарате "ЛОМО" для получения хорошей резкости на малых расстояниях применялись диоптрийные линзы. Фотоаппарат "ЛОМО" позволяет проводить подряд $6 \div 8$ снимков с периодом 0.5 с. Подсветка осуществлялась обычными лампами накаливания мощностью 500 Вт, расположенными сверху и сбоку.

Методика проведения экспериментов, разработанная в [36], состояла в проведении визуализации обтекания лунок в широком диапазоне скоростей: $3 \div 75$ см/с. Вертикальные оси симметрии двух лунок (рис. 2) находились примерно на расстоянии $0.77 \div 0.83$ 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 Рейнольдса зависели от дополнительного расстояния на поверхности конфузора, на котором начинал формироваться пограничный слой [36]. На основании результатов визуализации определялись характерные структуры потока в районе лунки и выбирались соответствующие места для проведения количественных измерений. Профили осредненной и пульсационных скоростей измерены с помощью однокомпонентного лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС), разработанного и изготовленного в Институте физико-технических проблем энергетики Литовской Академии наук.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Чтобы понять физическую картину обтекания лунки при любом указанном режиме, следует учитывать особенность течения в лунке. Представим, что лунка пересекается бесконечным количеством вертикальных плоскостей XOY , расположенных эквидистантно в трансверсальном направлении от края лунки до центрального сечения. В каждой плоскости XOY , за исключением первого сечения, проходящего через край 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 окажется, что по направлению к центру лунки постоянно уменьшается давление и увеличивается скорость течения вдоль образующей лунки. Таким образом, появляется компонента скорости течения жидкости в трансверсальном направлении от боковых краев лунки к центру.

Если спроецировать друг на друга указанные вертикальные плоскости поперечных сечений XOY , то получим семейство эквидистантных кривых линий пересечения плоскости XOY и поверхности лунки. Каждая кривая описывается частью соответствующей окружности с центром в одной и той же точке. Таким образом, получено семейство линий с различными радиусами кривизны так, что наименьший радиус кривизны соответствует крайнему сечению, а наибольший радиус кривизны соответствует сечению, проходящему через ось симметрии лунки. Известно, чем меньше радиус кривизны, тем больше гертлеровская неустойчивость течения [37]. На основании результатов измерений кинематических параметров течения в окрестности лунки с помощью лазерного анемометра были вычислены параметры Гертлера. Результаты показали, что все параметры находятся в области неустойчивости диаграммы Гертлера, но интенсивность вихрей на периферии лунки выше, чем вдоль оси симметрии.

Все это приводит к искривлению линий токов по направлению к центру лунки и к возникновению продольной завихренности вдоль каждой линии тока. Если представить обтекание лунки при первом режиме течения (при небольшой скорости), то в районе центральной части лунки поток будет плавно обтекать поверхность лунки. При обтекании боковых поверхностей лунки поток будет искривляться вдоль боковых поверхностей, что приведет к течению типа течения в воронке (давление вдоль продольной оси лунки наименьшее),

с одновременным появлением криволинейных вихрей типа Гертлера. Для проверки этих положений вначале было выполнено фотографирование картины визуализации обтекания лунки с помощью фотоаппарата "ЛОМО". В дальнейшем процесс фиксировался с помощью видеокамеры, когда последовательность каждого кадра определялась частотой чередования кадров в видеокамере. Кроме того, были изготовлены три варианта лунки с различными диаметрами и глубиной сферических сегментов лунок.

На рис. 3 приведены фотографии обтекания лунки 1, диаметр пересечения которой с плоской поверхностью дна рабочего участка составлял $d = 1.4 \cdot 10^{-2}$ м, а глубина лунки $h = 0.3 \cdot 10^{-2}$ м. Скорость обтекания лунки составляла $U_{\infty} = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с, безразмерный параметр глубины – $h/d = 0.214$, числа Рейнольдса – $Re_d = 6.93 \cdot 10^2$, $Re_x = 4.87 \cdot 10^4$. Лунка неглубокая и обтекается ламинарным потоком. На рис. 3–6, 9, 10 приведены фотографии обтекания лунок – вид сверху. Направление скорости потока сверху-вниз. На рис. 3 цифрами обозначены номер пленки (первая цифра) и номер кадра (вторая цифра). Каждый последующий кадр фиксирует картину течения через 0.5 с. Четвертый (1.6) и девятый (1.12) кадры соответственно зафиксировали картину течения через 1 с. Визуализация обтекания лунки выполнена с помощью фиолетовых струек, подаваемых через три отверстия диаметром 1 мм, расположенных на горизонтальной плоской поверхности. Расстояние между отверстиями составляет $7.5 \cdot 10^{-3}$ м. Высота баллона с цветной жидкостью (рис. 1) подбиралась для каждого значения средней скорости в рабочем участке, чтобы обеспечивать равномерное и безотрывное течение трех струек и позволить идентифицировать структуру потока в лунке.

На кадре 1.2 видно, что все струйки подкрашенной жидкости движутся вдоль поверхности лунки в направлении основного потока. При этом средняя струйка более размытая вследствие возрастания скорости обтекания лунки в ее середине. Две боковые струйки изгибаются по направлению к центру лунки вследствие уменьшения давления вдоль продольной оси лунки. Видно, что периферийные струйки частично вытекают из лунки под большим углом по сравнению с углом втекания струйки в лунку. Частично боковые струйки, достигнув задней кромки лунки, начинают течь в обратном направлении (против потока) в сторону переднего края лунки. Это происходит за счет указанных выше физических эффектов, в частности за счет эффекта течения в воронке. В результате в боковых областях на поверхности лунки возни-

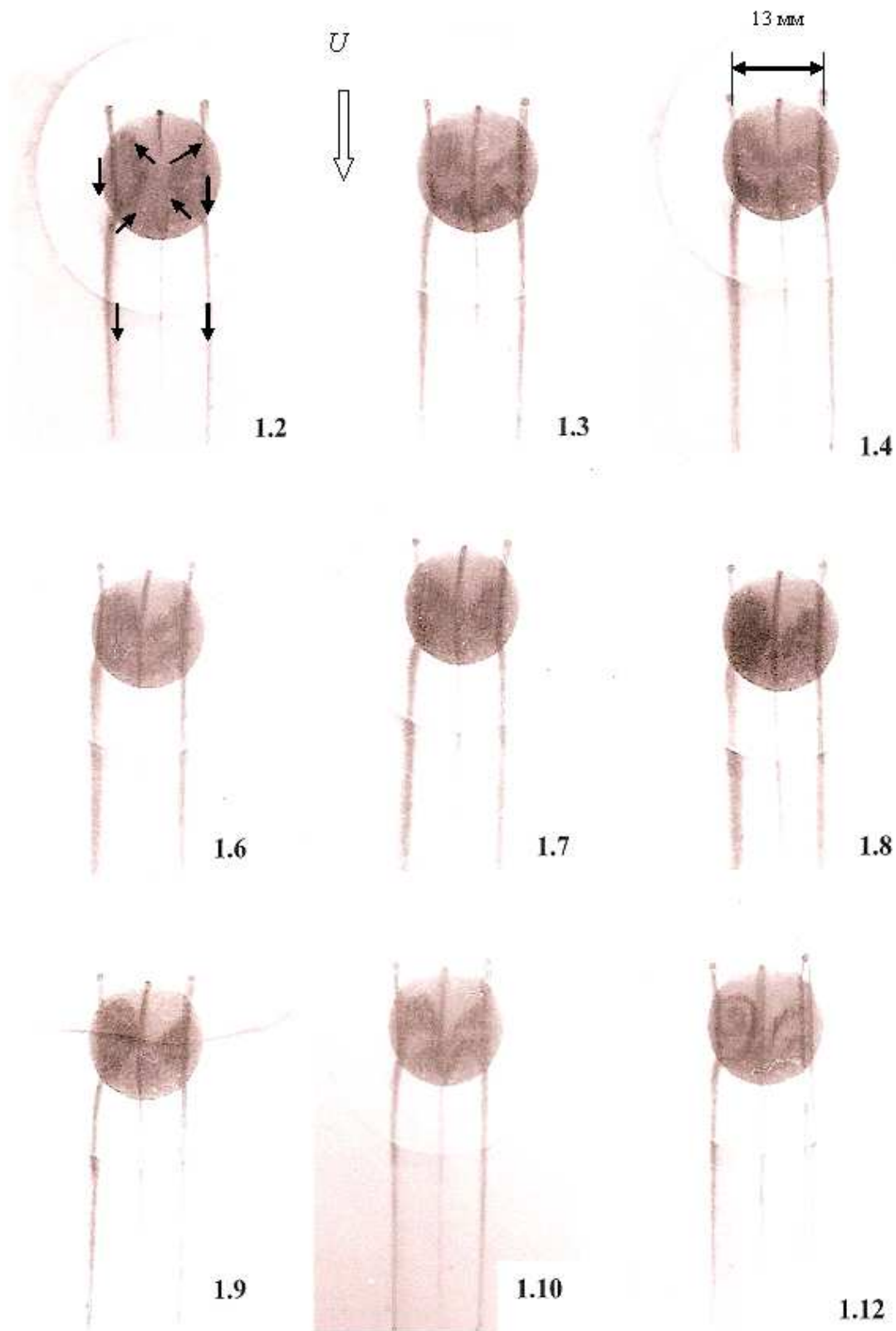


Рис. 3. Развитие картины течения в симметричной лунке при $U_{\infty} = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с

кает вращение струек вдоль образующей поверхности лунки против потока. Измерение распределения давления другими авторами (см. раздел 1) вдоль продольной оси лунки показало, что давление возрастает несимметрично вдоль продольной осевой образующей лунки и становится наибольшим при выходе потока из лунки. В соответствии с этим эффектом воронкообразное течение в лунке состоит из двух симметричных воронок. Справа и слева струйки вследствие возрастания давления по оси симметрии лунки возвращаются назад против направления основного потока так, как хорошо видно на кадре 1.12. В результате по бокам лунки формируются две области вихревого течения с вертикальной осью симметрии, направленной перпендикулярно к поверхности лунки. Так как поверхность лунки представляет собой часть поверхности сферы, то оси этих вихрей не будут постоянными во времени и пространстве. Таким образом, на кадре 1.2 по бокам лунки видны две несимметричные эллиптические области вращения жидкости. Большие оси этих эллипсов направлены квазипараллельно направлению потока. Более светлые места внутри этих эллиптических областей свидетельствуют, что интенсивность вращения там выше, чем в более темных областях, где подкрашенная жидкость диффундирует медленнее.

Кадры 1.3, 1.4 и 1.6 показывают эволюцию развития указанной пары вихрей. На кадре 1.3 происходит смыкание приведенных на кадре 1.2 двух эллиптических вихрей и образование одной квазиэллиптической области вращения жидкости, в которой большая ось квазиэллипса (ось вращения вихря) располагается в трансверсальном направлении в направлении оси OZ (ось OX направлена вдоль потока, а ось OY – вертикально вверх). Ось вращения этой области вследствие кривизны поверхности лунки – криволинейная и дугообразная. Похожая область вращения возникает при обтекании, например, прямоугольного углубления, расположенного поперек направления потока. Однако увеличение скорости течения в районе продольной оси лунки приводит снова к разрыву объединенной области вращения, которая примерно через 2.5 с преобразуется в пару первоначальных эллиптических областей вращения (кадр 1.7). Последующие кадры 1.8, 1.9, 1.10 и 1.12 повторяют указанную эволюцию пары вихрей в одну область вращения. Период такого цикла при данной скорости потока составляет $2.5 \div 3$ с.

На рис. 4 и 5 приведены закономерности формирования вихревых структур при обтекании лунки 2 при скоростях потока соответственно $7.5 \cdot$

10^{-2} м/с и $10 \cdot 10^{-2}$ м/с. Лунка 2 имеет такую же геометрию, но у переднего края лунки выполнена небольшая ступенька глубиной примерно $15 \div 20\%$ от глубины лунки. Во время установки лунки в рабочем участке гидродинамической трубы ступенька лунки оказалась направленной к оси OZ под углом примерно 8° . Числа Рейнольдса для первой скорости обтекания лунки составили $Re_d = 1.03 \cdot 10^3$, $Re_x = 8.85 \cdot 10^4$ и для второй скорости обтекания $Re_d = 1.39 \cdot 10^3$, $Re_x = 1.28 \cdot 10^5$. При скорости $7.5 \cdot 10^{-2}$ м/с (рис. 4) картина течения в лунке несколько изменилась. Значение цифр на рис. 4 и 5 такое же, как и на рис. 1. На кадрах 2.13, 2.14, 2.15 и 2.17 (рис. 4) наблюдается такая же пара эллиптических областей завихренности, которые показаны на кадрах 1.2 и 1.9 (рис. 3). На кадрах 2.2, 2.5 и 2.12 зафиксирована форма таких же вихрей, как и на кадрах 1.7 и 1.9 (рис. 3). Это – переходная форма вихрей, когда пара независимых эллиптических вихрей соединяется тонкой перемычкой. Отличие состоит в том, что из-за небольшой ступеньки в лунке на рис. 4 эти вихревые системы имеют угол скоса, определяемый углом наклона ступеньки по отношению к направлению потока. Кроме того, на рис. 4 не зафиксировано образование одного объединенного эллиптического вихря, показанного на рис. 3. Вместо объединенного вихря с трансверсальным направлением оси вращения (рис. 3, кадры 1.3, 1.4, 1.6 и 1.10) на рис. 4 зафиксировано образование с одной стороны более интенсивного одного бокового эллиптического вихря (кадры 2.4 и 2.16), который поочередно возникает с обеих боковых сторон лунки. При этом обнаружен такой же динамический процесс чередования вихревых структур. Период указанного цикла при скорости потока $7.5 \cdot 10^{-2}$ м/с уменьшился и составляет $2.0 \div 2.5$ с.

При возрастании скорости обтекания лунки до $10 \cdot 10^{-2}$ м/с (рис. 5) зафиксированы только боковые эллиптические области вращения жидкости, подобно приведенным на кадре 1.2 (рис. 3). Отличие состоит в том, что область вращения становится узкой и вытянутой в продольном направлении. В результате возрастания циркуляции скорости в середине этой области отсутствует краситель жидкости из-за его вымывания. Струйка, вытекающая за лунку из этой области завихренности, становится более размытой и имеет вид, свидетельствующий о формировании за лункой системы продольных вихрей [36].

Форма лунки 1 была еще раз модифицирована (лунка 3). С левой стороны по отношению к направлению потока на рис. 6 глубина лунки сохранилась прежней: $h = 0.3 \cdot 10^{-2}$ м. Макси-

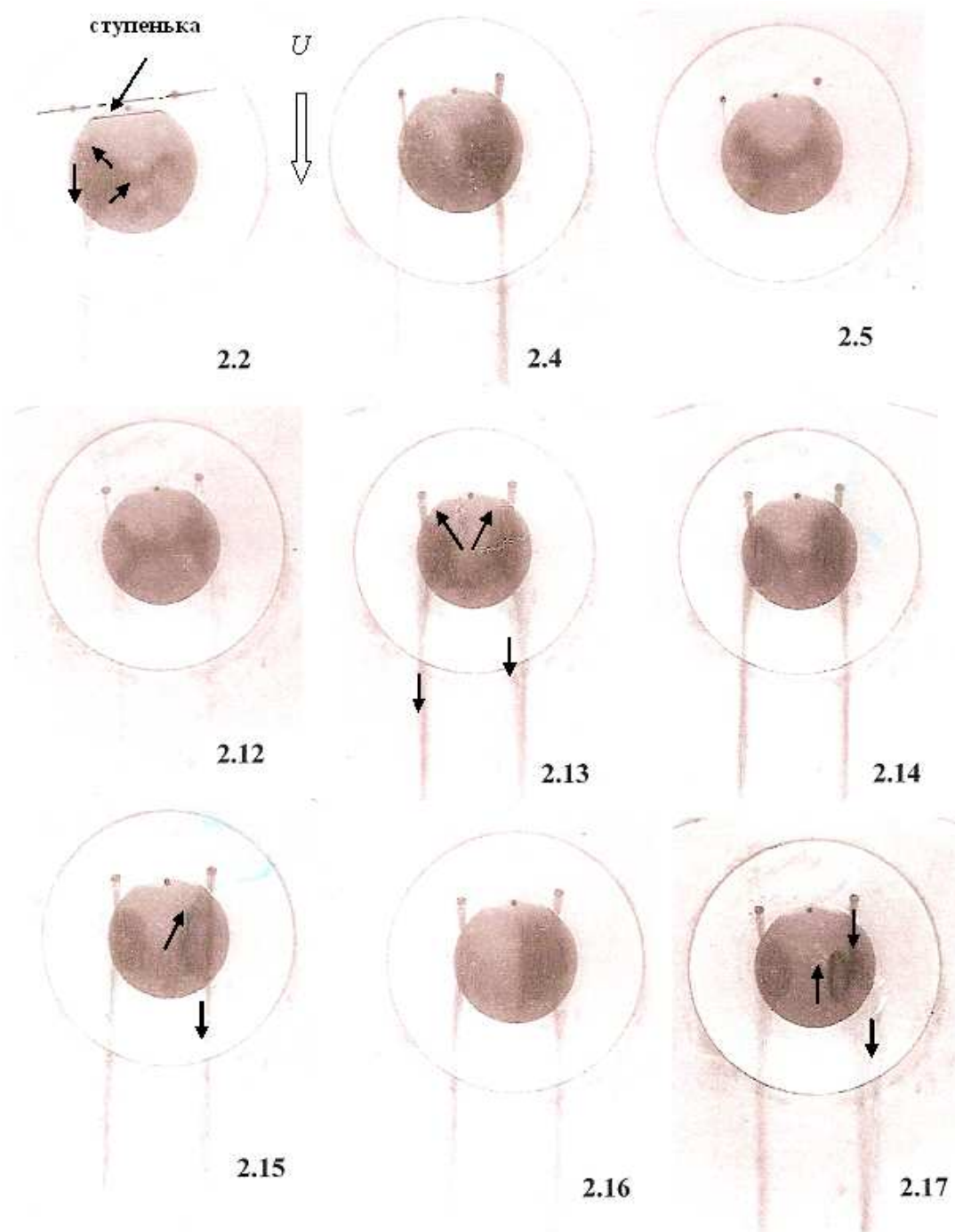


Рис. 4. Развитие картины течения в лунке со ступенькой при $U_{\infty} = 7.5 \cdot 10^{-2}$ м/с

мальная глубина лунки находилась не в центре лунки, а на расстоянии примерно четверти диаметра лунки (диаметр лунки z остался прежним $d = 1.4 \cdot 10^{-2}$ м). С противоположной правой стороны глубина лунки практически равнялась нулю. Поверхность лунки со стороны, где $h = 0$, плавно

сопрягалась с местом, где глубина лунки была максимальной. Такая форма лунки условно названа “горизонтальной полукаплей”, расположенной поперек направлению потока. Скорость потока составляла $U_{\infty} = 7.8 \cdot 10^{-2}$ м/с. Соответствующие числа Рейнольдса $Re_d = 1.08 \cdot 10^3$, $Re_x = 9.59 \cdot 10^4$.

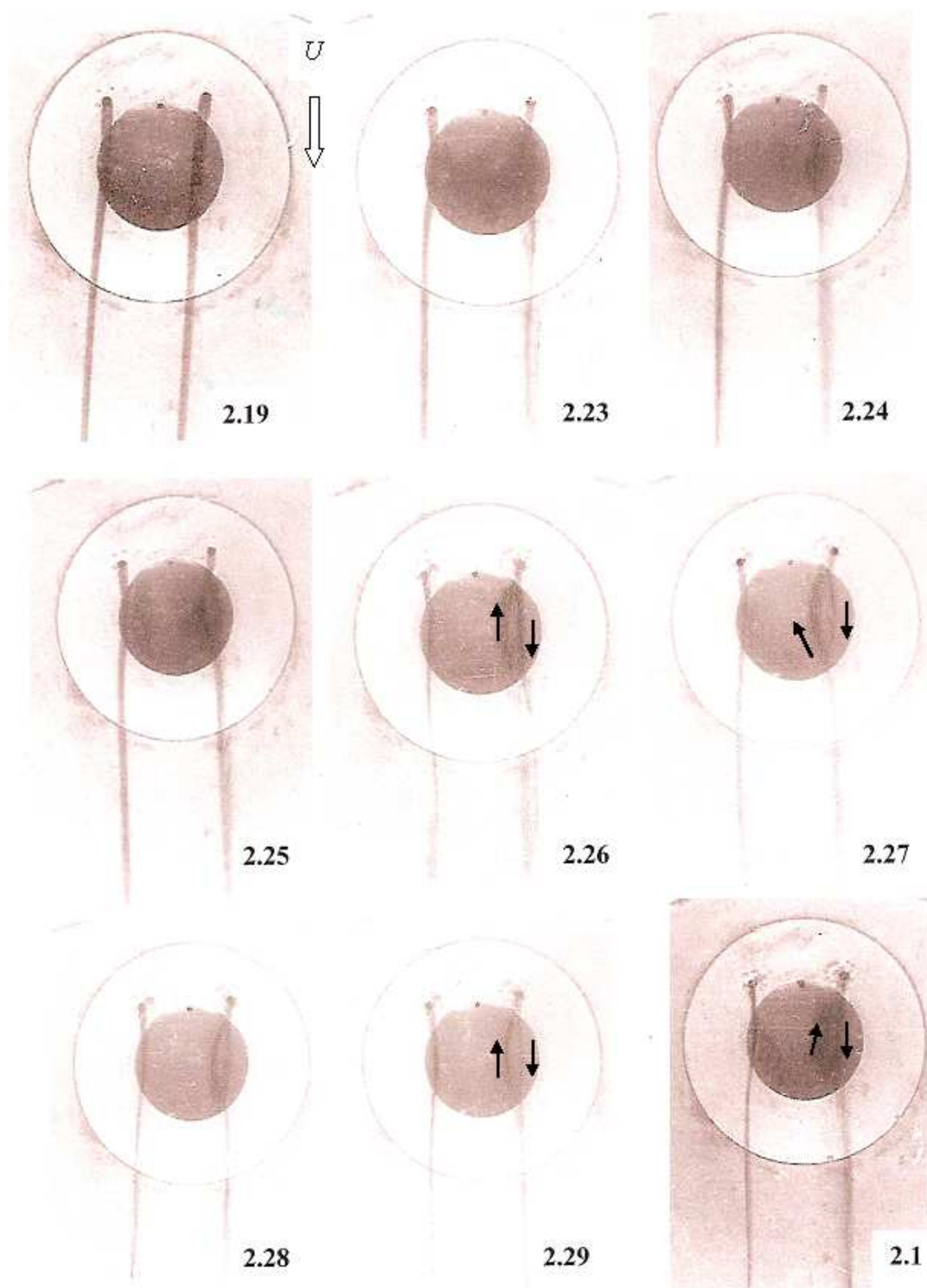


Рис. 5. Развитие картины течения в лунке со ступенькой при $U_{\infty} = 10 \cdot 10^{-2}$ м/с

В области максимальной глубины лунки формируется устойчивый эллиптический вихрь, продольный размер которого зависит от скорости

обтекания: с ростом скорости размеры вихревой области уменьшаются. На всех кадрах видно, что струйка, инжектируемая из среднего дренажно-

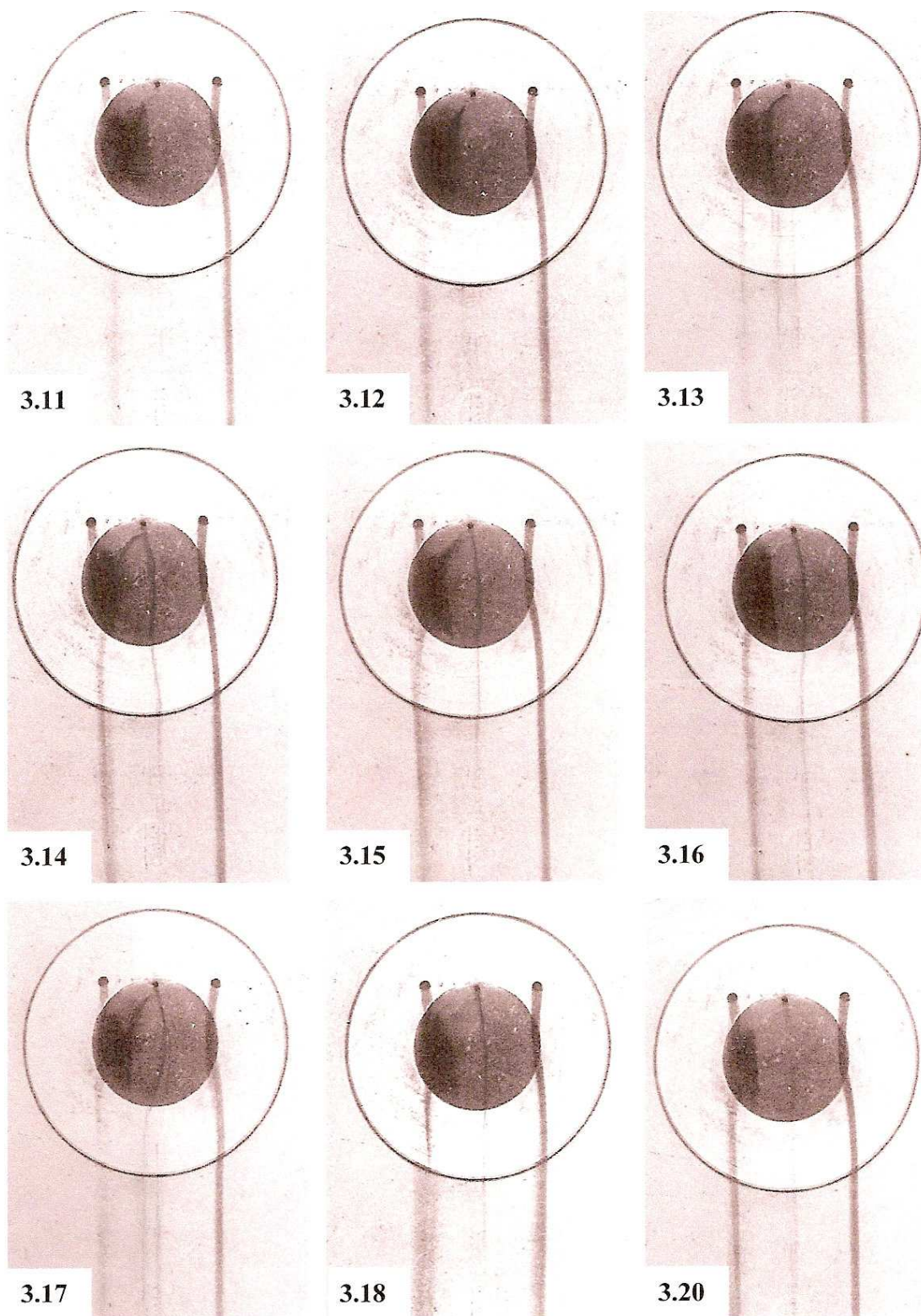


Рис. 6. Развитие картины течения в лунке типа "горизонтальная полукапля" при $U_{\infty} = 7.8 \cdot 10^{-2}$ м/с

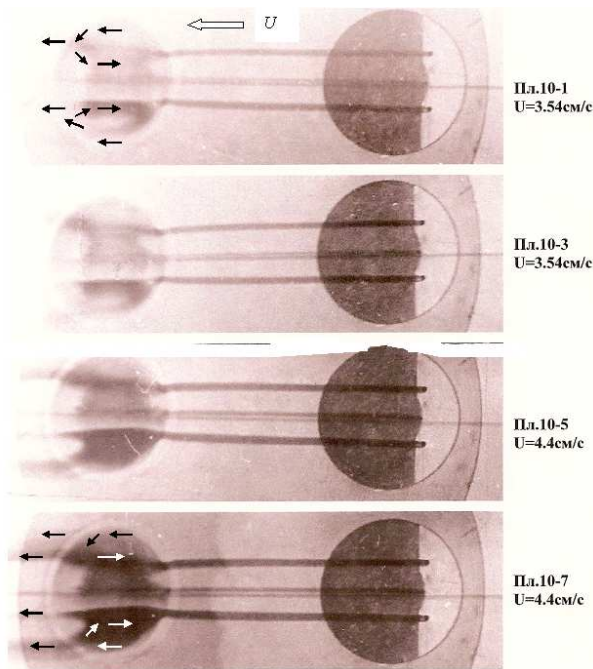


Рис. 7. Фотографии развития картины течения в лунке 13 при различной скорости обтекания, $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м

го отверстия, втягивается в эллиптический вихрь, в котором давление понижается. Кроме того, на кадрах 3.14–3.18 видно, что средняя струйка раздваивается: одна часть струйки течет в эллиптический вихрь, а вторая часть изгибается в противоположную сторону. Можно предположить, что в области, ограниченной этими частями средней струйки, сформировался более интенсивный второй продольный эллиптический вихрь. Приведенные на рис. 3–6 результаты экспериментов получены в апреле 1990 г.

Исследовано также влияние диаметра и глубины лунки при различных скоростях потока на особенности течения в лунке (опыты проводились в декабре 1990 г.). На рис. 7 приведены результаты визуализации обтекания симметричной лунки (лунка 13), размеры которой увеличены по сравнению с первой лункой и составили $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2.0 \cdot 10^{-2}$ м ($h/d = 0.25$). Направление потока – справа налево. На рис. 7 справа показан номер пленки, на которой фотографировалась структура потока, а второй цифрой обозначен номер кадра при каждой скорости обтекания лунки. Первые два кадра зафиксированы при скорости потока $U_\infty = 3.54 \cdot 10^{-2}$ м/с. Соответствующие числа Рейнольдса при этой скорости составили $Re_d = 7.0 \cdot 10^2$, $Re_x = 3.5 \cdot 10^4$.

Так как диаметр лунки был увеличен, то визуализация осуществлялась с помощью инъекции подкрашенных струек из втулки, расположенной выше по потоку (рис. 2). Посредине кадров видна струйка, которая подавалась через трубочку, расположенную вдоль продольной оси вставки на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м от края вставки (на рис. 7 справа). Эта трубочка располагалась от поверхности дна на расстоянии $5 \cdot 10^{-3}$ м. Видно, что струйка, инжектируемая из этой трубочки, равномерная при течении вдоль всего кадра. На расстоянии $3 \cdot 10^{-2}$ м от отверстия для осевой трубочки в круглой вставке (рис. 2), выполнено три отверстия поперек потока, расстояние между которыми приведены на рис. 3. Струйки, инжектируемые из этих трех отверстий, движутся до лунки также без возмущений. Однако лунка оказывает влияние на течение и против потока. Поэтому на фотографиях видно, что при приближении к лунке крайние струйки изгибаются навстречу друг другу вследствие указанных выше распределений давления внутри лунки.

Структура потока внутри лунки на первых четырех кадрах (рис. 7) ($U_\infty = 3.54 \cdot 10^{-2}$ м/с и $U_\infty = 4.4 \cdot 10^{-2}$ м/с) напоминает картины вихревого течения на кадрах 1.3, 1.4, 1.6 и 1.10, рис. 3 ($h = 0.3 \cdot 10^{-2}$ м, $d = 1.4 \cdot 10^{-2}$ м). Так как диаметр лунки на рис. 7 больше, то визуализирующие струйки попадают на эту лунку не по краям лунки, как на рис. 3, а на расстоянии примерно $1/3$ диаметра лунки. Однако формирование вихрей внутри лунки такое же, как и на рис. 3. При входе струйки в лунку под влиянием эффекта "воронки" течение происходит по периферии лунки так, как показано маленькой стрелкой. При подходе к задней кромке лунки поток частично вытекает из лунки, а частично возвращается против потока (показано второй маленькой стрелкой). Формируется эллиптический вихрь с вертикальной осью вращения. Между сформировавшейся парой этих вихрей происходит обмен течением подобным образом, как показано на кадрах 1.3, 1.4 и 1.6 рис. 3. Между парой продольных периферийных эллиптических вихрей в лунке 13 формируется слабый эллиптический поперечный вихрь подобно обнаруженному в лунке 1 (рис. 3). На первых четырех кадрах рис. 7 из лунки поток вытекает в основном по периферии лунки в виде двух широких полос, свидетельствующих о формировании пары продольных вихрей за лункой. Расстояние между этими вихрями меньше или примерно равно диаметру лунки: $\lambda_z \leq d$.

Последующие четыре кадра на рис. 8 получены при большей скорости обтекания лунки ($U_\infty =$

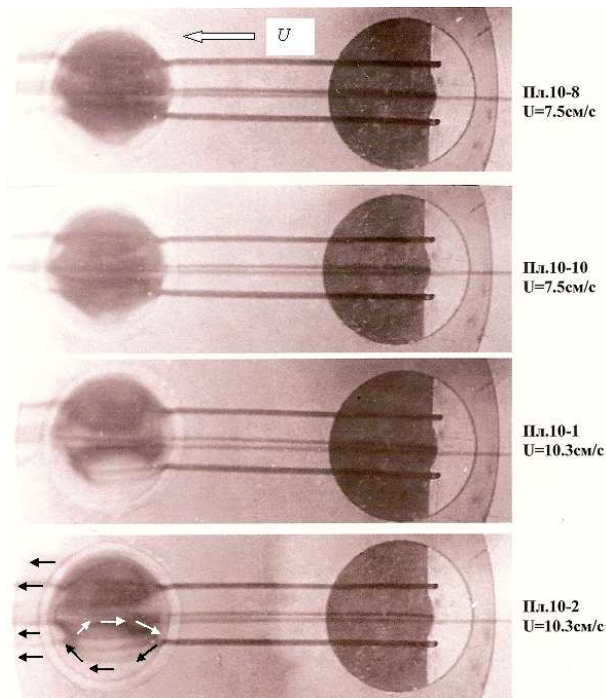


Рис. 8. Фотографии развития картины течения в лунке 13 при различной скорости обтекания, $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м

$7.5 \cdot 10^{-2}$ м/с и $U_{\infty} = 10.3 \cdot 10^{-2}$ м/с). Как и на рис. 4 и 5, при возрастании скорости обтекания циркуляция скорости в продольных эллиптических вихрях возрастает, поэтому визуализирующая краска вымывается интенсивнее из вихревых образований. Продольные эллиптические вихревые структуры не имеют застойных областей с медленно вращающейся краской. Поверхности этих вихревых структур обтекаются тонкими струйками визуализирующей краски, а продольные эллипсы самих вихревых структур становятся более вытянутыми вдоль потока. Слабый поперечный вихрь между продольными эллиптическими вихрями практически вымывается и в виде узкой области смещается к выходу потока из лунки (задний край лунки). В результате поток вытекает из лунки также в виде пары продольных вихрей. Ввиду их повышенной интенсивности краска, идентифицирующая эти вихри, существенно размывается. При этом расстояние между этой парой вихрей существенно уменьшается и составляет примерно половину диаметра лунки: $\lambda_z \approx 0.5d$. Соответствующие числа Рейнольдса при скоростях $U_{\infty} = 4.4 \cdot 10^{-2}$ м/с, $U_{\infty} = 7.5 \cdot 10^{-2}$ м/с и $U_{\infty} = 10.3 \cdot 10^{-2}$ м/с составили $Re_d = 8.7 \cdot 10^2$, $Re_x = 4.28 \cdot 10^4$, $Re_d = 1.48 \cdot 10^3$, $Re_x = 8.85 \cdot 10^4$, $Re_d = 2.04 \cdot 10^3$, $Re_x = 1.31 \cdot 10^5$.

Результаты визуализации обтекания лунки 13, приведенные на рис. 7 и 8, были зафиксированы с помощью фотоаппарата "ЛЮМО" и видеокамеры. Видеофильм был обработан с помощью программы "virtualdub" и представлен выборочно в виде покадровой кинограммы. На рис. 9 приведена кинограмма обтекания лунки 13, направление скорости обтекания лунки – сверху вниз. На кадре *a* обозначено: 1 – визуализирующие струйки, 2 – лунка, 3 – круглая вставка в дне рабочего участка. Из трех отверстий инжектировались струйки фиолетового цвета, а из осевого насадка, расположенного выше по потоку, – струйка красного цвета. Визуализация этой серии опытов *a* – *d* проводилась при скорости потока $U_{\infty} = 5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Кадр *a* соответствует кадру № 17 кинограммы с начала съемки (0.68 с), соответственно кадр *b* – кадру № 28 кинограммы (1.12 с), кадр *c* – кадру № 62 кинограммы (2.48 с) и кадр *d* – кадру № 509 кинограммы (20.12 с).

Структура течения соответствует первым четырем кадрам на рис. 7. Кинограмма позволила определить, что поток, визуализируемый с помощью красной струйки, искривляется над лункой и проникает в структуру течения в лунке. Под влиянием поперечной вихревой структуры, расположенной между двумя продольными вихрями в лунке (см. текст к описанию рис. 7), красная краска диффундирует в продольные вихревые структуры и участвует во вращательном движении в боковых продольных вихревых структурах. В осевой части за лункой практически не видно красной краски. В боковых вихревых структурах, вытекающих из лунки, красная краска располагается в центральной области продольных полос, а фиолетовая краска располагается в периферийной области этих полос. При этом в процессе вращения жидкости внутри лунки краски перемешиваются, так что за лункой цвет красителей существенно изменился. Как видно из этой серии визуализационных картин, обтекание лунки при малой скорости потока устойчивое. Однако наблюдается чередование картин обтекания примерно через 100 кадров (4 с). Кроме того, расположение различных красителей в следе за лункой в кадрах *a* и *d* заметно отличается, что подтверждает вихревое течение и процесс перемешивания внутри лунки.

На рис. 9 приводятся результаты визуализации обтекания лунки 13 при скорости потока $U_{\infty} = 10 \cdot 10^{-2}$ м/с (*e*, *f*, *g*, *h* и 8). Структура течения соответствует остальным четырем кадрам на рис. 8. С ростом скорости основного потока циркуляция продольных вихрей внутри лунки увеличивается, в результате происходит более интенсив-

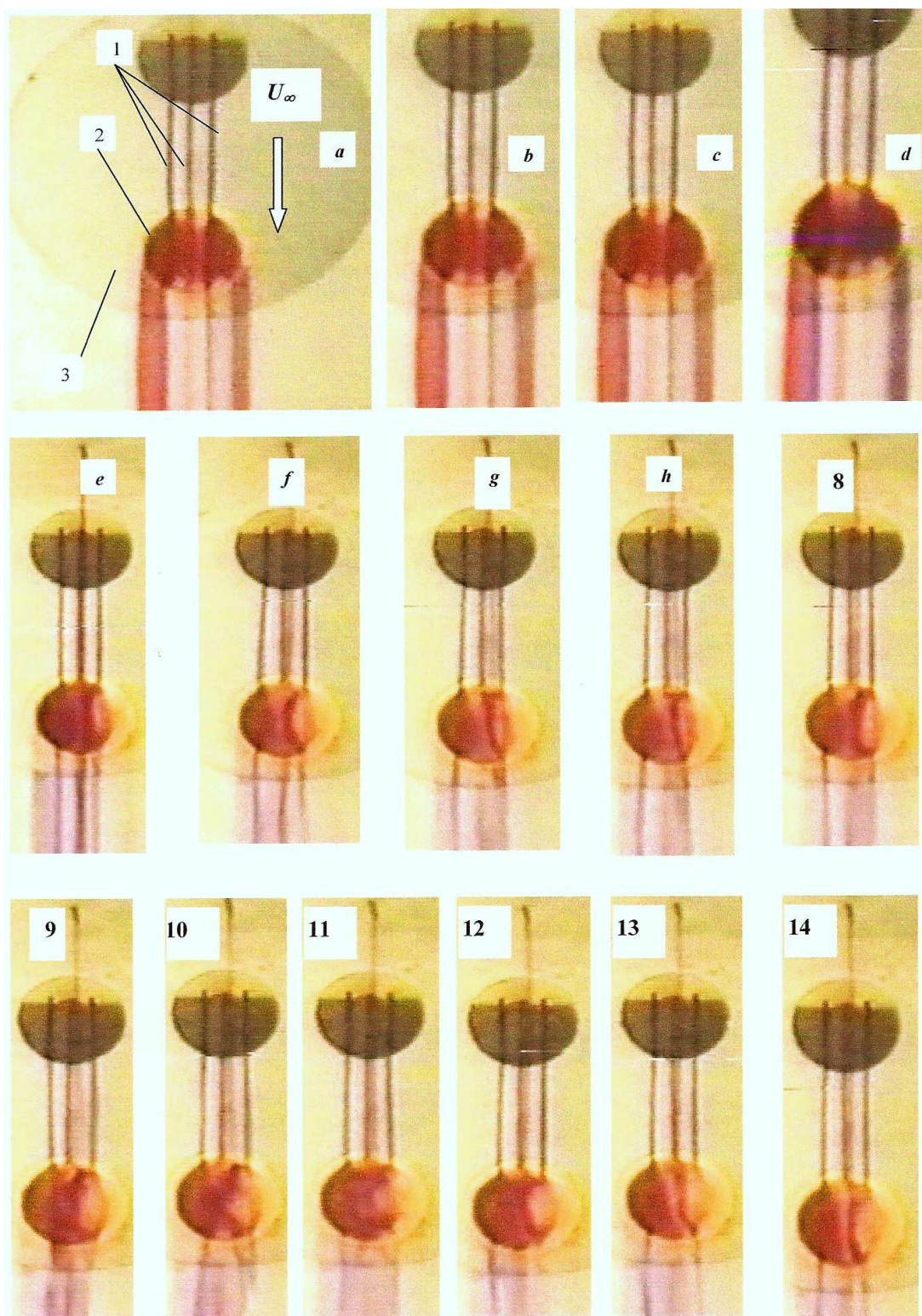


Рис. 9. Кинограмма розвитку картини течія в лунці 13 при різній швидкості обтекання, $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м
і $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м

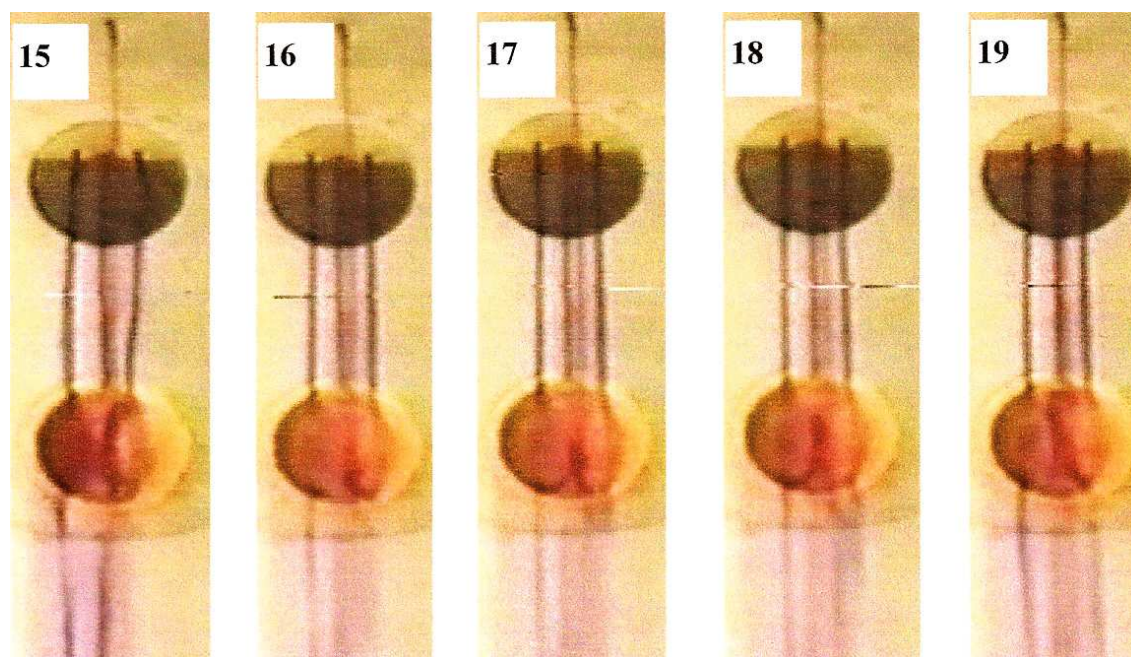


Рис. 10. Кинограмма развития картины течения в лунке 13 при различной скорости обтекания, $h = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м

ное перемешивание струек различного цвета внутри лунки. Кадр *e* соответствует кадру № 2569 кинограммы (1 мин.42.68 с, после кадра *d* через 1 мин.22.64 с), соответственно кадр *f* – кадру № 3702 кинограммы (2 мин.28.08 с, через 45.4 с), кадр *g* – кадру № 3742 кинограммы (2 мин.29.68 с, через 1.6 с), кадр *h* – кадру № 3750 кинограммы (2 мин.30.0 с, через 0.32 с), кадр 8 – кадру № 3828 кинограммы (2 мин.33.12 с, через 3.1 с после предыдущего кадра *h*). В кадре *e* после очередного выброса жидкости из лунки начинают формироваться продольные вихревые структуры, которые сформировались в два боковых продольных эллиптических вихря в кадре *f*. Как видно из предыдущих фотографий, периферийные струйки при попадании в лунку с переднего края диффундируют вследствие вращения течения в эллиптическом вихре. Часть потока струйки в области задней (выходной) кромки лунки вытекает за лунку, а большая часть этой струйки возвращается по дуге (боковая поверхность продольного вихря) снизу вверх к точке входа струйки в лунку. На этом кадре четко видны X-образная граница продольных вихрей, расположенная в центре лунки. Вдоль этой границы движение потока медленное, поэтому краска не диффундирует. Такая картина свидетельствует о том, что интенсивность вращения внутри продольных вихрей несимметрична и наибольшая в районе боковой поверхности лун-

ки. Две центральные струйки при входе в лунку диффундируют вследствие возрастания скорости в продольном осевом направлении внутри лунки и поглощаются боковыми эллиптическими вихрями. В этом кадре *f* начинается выброс жидкости из лунки, о чем свидетельствует сравнение течения за лункой с кадром *e*, в том числе и в следе за лункой.

В кадрах *g*, *h* продолжается выброс жидкости из лунки, но при этом продолжается движение в темной обратной струйке внутри лунки справа снизу вверх. X-образная структура и форма боковых продольных вихревых структур искажаются. Кадр *g* следует после кадра *f* через 1.6 с, а кадр *h* после кадра *g* через 0.32 с. Отсюда различия между кадрами *f* и *g* заметные, а между кадрами *g* и *h* – небольшие. Вихревая структура на кадрах *g*, *h*, расположенная слева, вытягивается вниз, так как выброс жидкости происходит из этого эллиптического вихря. Граница вихревой структуры, расположенная справа в лунке, поджимается этим выбросом снизу и деформируется так, что максимум диаметра правого продольного вихря на кадре смещается кверху, так как выброс сопровождается повышением давления во время выброса. Кадр 8 зафиксирован через 3.12 с после кадра *h*, выброс из лунки с правой стороны закончился, сформировалась снова симметричная X-образная структура, как следствие продольных эллиптиче-

ских вихрей. Кадры e и 8 практически идентичные и свидетельствуют о цикличности выбросов из лунки.

Динамика развития вихревых структур в лунке более полно приведена в серии кадров 9–15 (рис. 9, 10), которые фактически являются продолжением развития процесса движения в лунке, приведенного на предыдущих кадрах. Кадр 9 соответствует кадру № 3934 кинограммы (2 мин.37.36 с, через 4.1 с после кадра 8), кадр 10 – кадру № 3946 кинограммы (2 мин.37.84 с, через 0.48 с), кадр 11 – кадру № 3973 кинограммы (2 мин.38.92 с, через 1.08 с), кадр 12 – кадру № 4027 кинограммы (2 мин.41.0 с, через 2.16 с), кадр 13 – кадру № 4365 кинограммы (2 мин.54.60 с, через 3.52 с), кадр 14 – кадру № 4392 кинограммы (2 мин.55.68 с, через 1.08 с), кадр 15 соответствует кадру № 4447 кинограммы (2 мин.57.88 с, через 2.2 с). В кадре 9 через 4.1 с после кадра 8 начинает формироваться выброс из лунки с левой стороны. Процесс длится до 12 кадра включительно (интервал времени – 3.72 с), 13 кадр зафиксирован через 3.52 с. На 14 и 15 кадрах рис. 10 через 3.28 с снова сформировалось X-образная структура (кадры e , 8, 14 и 15 – подобные). Таким образом, в среднем через 4 с повторяется цикл изменения формы и взаимодействия вихревых структур, формирующихся в лунке 13 при данной скорости потока.

Серия кадров 16–19 (рис. 10) демонстрирует динамику формирования продольных вихревых структур в лунке 13. Кадр 16 соответствует кадру № 5059 кинограммы (3 мин.22.36 с, через 1 мин.24.46 с после предыдущего кадра 15), кадр 17 – кадру № 5068 кинограммы (3 мин.22.72 с, через 0.36 с), кадр 18 – кадру № 5085 кинограммы (3 мин.23.40 с, через 0.68 с), кадр 19 – кадру № 5114 кинограммы (3 мин.24.56 с, через 1.16 с). После очередного выброса жидкости из лунки на кадре 16 внизу зарождаются струи (темная краска), которые направляются по контуру продольных вихревых структур в противоположном направлении основного потока (снизу вверх). На кадрах 17 и 18 эти струи приближаются к переднему контуру лунки. На кадре 19 струи разворачиваются и движутся вдоль направления основного потока совместно с первоначальными подкрашенными струями по периферии лунки. На этом кадре снова сформировалась X-образная структура. На видеофильме хорошо видна циркуляция скорости снизу вверх в центральной части лунки, а по периферии лунки – вдоль основного потока вниз по контуру эллиптических вихревых структур. Зная время между кадрами и масштаб лунки, можно подсчитать окружную скорость на периферии эллиптических

вихрей при данной скорости потока.

На рис. 3–8 представлена визуализация течения в лунках при первом режиме их обтекания, когда числа Рейнольдса соответствуют ламинарному и переходному режиму течения в пограничном слое. При больших скоростях потока возмущения, сформировавшиеся в пограничном слое, взаимодействуют с вихревыми структурами в лунках и вызывают неустойчивости течения в лунках и периодические выбросы жидкости из лунок.

Увеличение скорости потока в гидродинамической трубе приводят к формированию в пограничном слое последующих этапов перехода вплоть до турбулентного режима течения [36, 37]. Визуализировать течение в лунке с помощью приведенного метода в водном потоке с ростом скорости не представляется возможным. В связи с этим через 10 лет была разработана малая аэродинамическая труба, в которой исследовалось, в частности, обтекание лунок при больших скоростях потока и числах Рейнольдса [31–33]. Были опубликованы кинематические параметры потока, измеренные с помощью термоанемометра вдоль продольной оси лунок. Для понимания процесса течения в лунке была разработана методика проведения дымовой визуализации. Результаты опытов, зафиксированные с помощью видеокамеры, были раскодированы тем же методом, что и при обтекании лунки водным потоком.

На рис. 11 (вид сверху) приведен пример кинограммы течения в лунке при скорости потока 3 м/с. Направление потока – снизу вверх. Для визуализации потока была изготовлена цилиндрическая втулка, выполненная из фторопласта, в которой была изготовлена канавка глубиной, равной диаметру нихромовой проволоки, устанавливаемой в этой канавке. К проволоке подводилось электрическое напряжение. Имелось также отверстие сзади проволоки, через которое на поверхность проволоки подавалось моторное масло. Втулка устанавливалась перед лункой. При подаче напряжения на проволоку масло нагревалось, и с проволоки стекала дымовая струйка, визуализирующая течение в лунке и в ее окрестности. Размеры полусферической лунки составили $h = 0.9 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2.0 \cdot 10^{-2}$ м ($h/d = 0.45$). Лунка и цилиндрическая втулка устанавливались заподлицо вдоль продольной оси пластины размером 0.65×0.1 м. Эта пластина устанавливалась горизонтально вдоль продольной оси рабочего участка малой аэродинамической трубы, выполненной в виде прозрачного цилиндра с внутренним диаметром 0.1 м. Центр полусферы располагался на расстоянии 0.5 м от переднего края пластины. Эк-

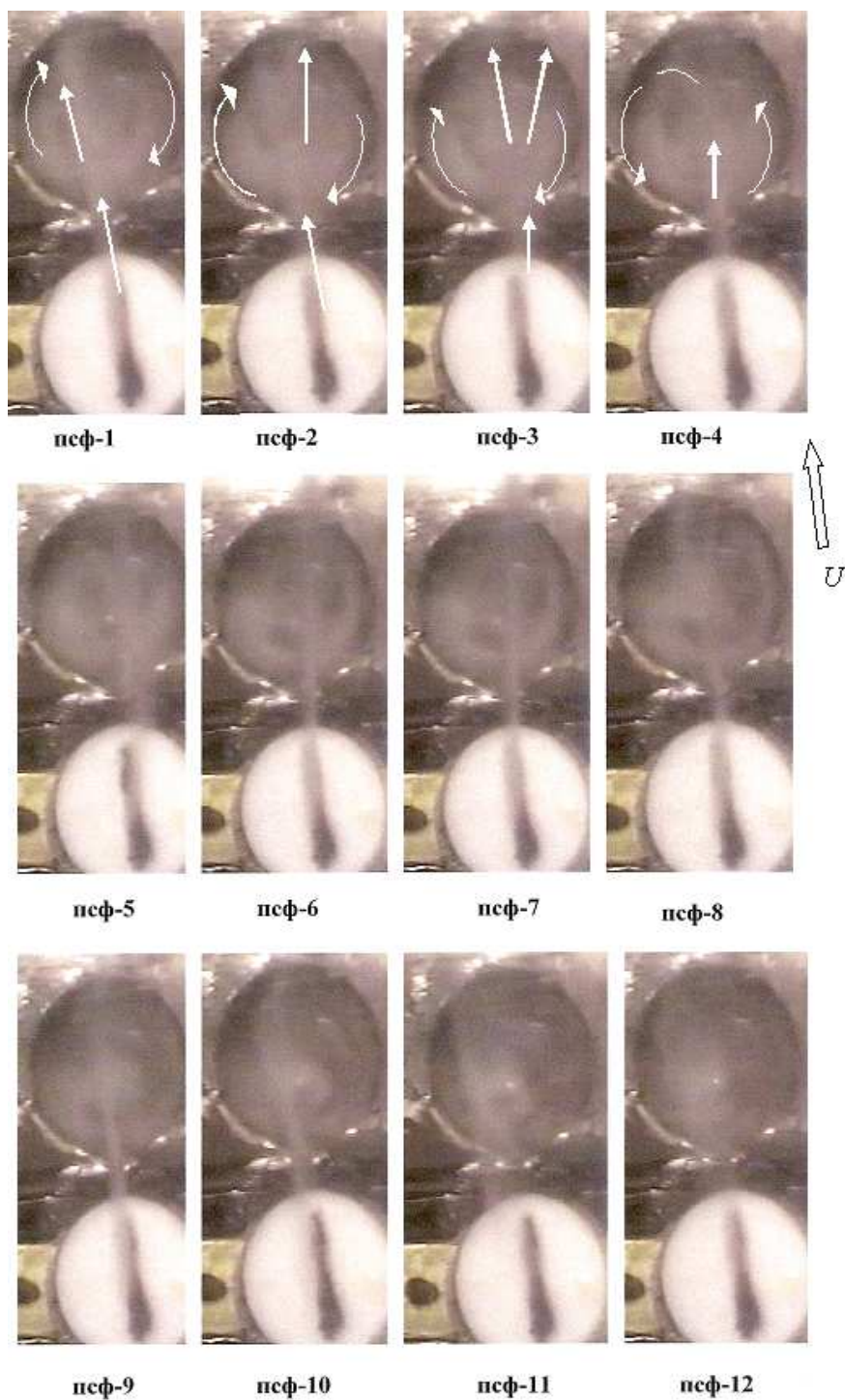


Рис. 11. Кинограмма развития картины течения в полусферической лунке при скорости воздушного потока 3 м/с, $h = 0.9 \cdot 10^{-2}$ м и $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м

сперименты проводились в диапазоне чисел $Re_x = (0.9 \div 5.2) \cdot 10^5$. Скорость потока воздуха для полусферической лунки, приведенной на рис. 9, ставила 3 м/с, а числа Рейнольдса – соответственно $Re_d = 0.4 \cdot 10^4$ и $Re_x = 1 \cdot 10^5$. Указанные числа Рейнольдса – того же порядка, что и в опытах,

приведенных на рис. 7 и 8 при обтекании лунки водным потоком со скоростью $U_\infty = 10 \cdot 10^{-2}$ м/с.

На рис. 11 номера соответствуют последовательным кадрам в выбранной серии процесса визуализации. Каждый кадр следует через 0.04 с. На рис. 11 приведена характерная картина обтекания полусферической лунки. На первых трех кадрах видно последовательное вращение сформировавшегося вихря, вращающегося внутри лунки по часовой стрелке, как показано криволинейными стрелками. При обтекании воздухом полусферической лунки такое вращение обусловлено эффектом воронкообразного течения, которое зафиксировано при обтекании различных лунок водным потоком. Одновременно видно, как струя дыма, генерируемая с расположенной выше по потоку фторопластовой втулки, начиная с первого кадра, перемещается направо относительно направления потока. На третьем кадре прямыми короткими стрелками показано направление дымовой струи, которая преобразовалась в форму веера. В этот момент происходит выброс вихря из лунки в районе правой половины лунки.

После выброса из лунки кольцевого вихря направление вращения в лунке изменяется на противоположное. Как видно на 4 кадре, струйка дымовой визуализации засасывается в лунку в область воронкообразного вращения против часовой стрелки. На кадрах 5–9 видны последовательные фазы вращения вихря внутри лунки против часовой стрелки. На кадрах 10–12 зафиксированы отдельные фазы выброса вихря из лунки, но теперь уже с левой стороны лунки. Таким образом, на кадре 3 закончился выброс из лунки с правой стороны, а на кадре 12 – с левой стороны. Цикл чередования выбросов составил примерно 0.4 с. При указанной скорости воздушного потока в полцилиндрической лунке период выбросов уменьшился на порядок по сравнению с обтеканием сегментной лунки в водном потоке.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов визуализации 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 Рейнольдса, соответствующих различным этапам переходного пограничного слоя на пластине до места расположения лунок. Были исследованы круглые сегментные лунки с параметром ($h/d = (0.214 \div 0.25)$) и при числах Рейнольдса до $Re_d =$

$0.4 \cdot 10^4$ и $Re_x = 1.31 \cdot 10^5$. При различных конфигурациях сегментных лунок зафиксировано формирование в лунках пары продольных эллиптических вихрей с вращением внутри лунок против потока. Периодически эта пара вихрей соединяется перемычкой в виде поперечного вихря. Под влиянием возмущений, возникающих на определенных этапах перехода пограничного слоя, сформировавшегося на пластине до лунок, вихревые системы в лунках выбрасываются поочередно с боковых сторон лунок. При указанных и меньших числах Рейнольдса поток постоянно вытекает из лунок по периферии. При большей скорости за лункой формируется пара вихрей, длина волны которых $\lambda_x \leq d$. Сформулированы физические особенности обтекания лунок, приводящих к формированию обнаруженных вихревых систем в лунках. Объяснен механизм, подобный течению в воронке, вызывающий особенности формирования вихрей в зависимости от скорости потока.

2. При больших скоростях потока и диаметре лунки выполнен анализ вихревых структур по данным фотографирования и кинограмм. Период плавных выбросов из лунки при малой скорости составил $2.5 \div 3$ с, а с увеличением скорости уменьшается до $2.0 \div 2.5$ с. Кинограмма позволила зафиксировать формирование продольных вихревых структур после выброса вихрей из лунки.

3. Характер обтекания полусферической лунки воздушным потоком изменился. В полусферической лунке при скорости потока 3 м/с и числах Рейнольдса $Re_d = 0.4 \cdot 10^4$ и $Re_x = 1.0 \cdot 10^5$ кинограммы позволили зафиксировать формирование воронкообразного вращения одного вихря, заполняющего всю лунку. После выброса этого вихря из лунки вращение вновь сформировавшегося вихря происходит в противоположную сторону. Выбросы происходят поочередно с периферии лунок. Период выбросов из лунки составил 0.4 с. Моделирование формирования вихрей в лунке при обтекании водным и воздушным потоком позволило определить, что при одинаковых числах Рейнольдса Re_x форма и структура вихрей существенно зависит от скорости обтекания и геометрических параметров лунки.

4. Визуализация обтекания лунок различной формы и при различных скоростях потока показала, что характер движения вихрей в лунке нестационарный. Поэтому необходимо вначале выполнять визуализацию обтекания лунок, а затем выбирать характерные места в лунках для проведения количественных измерений кинематических параметров потока. В связи с этим в дальнейшем были выполнены измерения с помощью

лазерного измерителя скорости на различных расстояниях вдоль оси OX и OZ .

1. Hoerner Sighard F. FLUID-DYNAMIC DRAG. Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance.– Berl.: Published by the Author, 1965.– 467 p.
2. Wieghardt K. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen // Jharb. D. Lufv 1943 or Technische Berichte.– 1943.– Vol. 10, N9.– P. 65–81.
3. Tillmann W. Neue Widerstandmessungen an Oberflächenstörungen in der turbulenten Reibungsschicht // Forschungshefte für Schiffstechnik.– 1953.– N2.– P. 81–88.
4. Ткачук Г. Н. Об учете надбавки на местную шероховатость, вызванную нишами и отверстиями в корпусе судна // Труды НТО судостроительной промышленности.– 1959, вып. 1.– С. 48–60.
5. Михайлов В. Н., Ткачук Г. Н. Влияние шероховатости корпуса судна на сопротивление воды.– Л.: Судостроение, 1971.– 152 с.
6. Чжень П. Отрывные течения. Том второй.– М.: Мир, 1973.– 280 с.
7. Hardin Jay C., Stuart Pope D. Sound Generation by Flow over a Two-Dimensional Cavity // AIAA Journal.– 1995.– Vol. 33, N3.– P. 407–412.
8. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осцилляций внутри обтекаемой полусферической лунки // Акустический вестник.– 2007.– N4.– С. 36–46.
9. Pressner K. H. Empirische Gleichung für Berechnung der Stoff und Warmenbetragung für den Sperrfall der Abgerissenen Stromung // Wärme- und Stoffübertragung.– 1968.– 1.– P. 225–236.
10. Снидкер Р., Дональдсон К. Исследование течения с двумя устойчивыми состояниями в полусферической каверне // Ракетная техника и космонавтика.– 1966.– N6.– С. 227–228.
11. Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К. Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости // Доклады АН СССР.– 1986.– 290, 6.– С. 1315–1319.
12. Гачичеладзе И. А., Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К. и др. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур // Тепло-массообмен, ММФ–88^н. Проблемные доклады.– Минск: ИТМО АН БССР, 1988.– С. 83–125.
13. Волчков Э. П., Калинина С. В., Матрохин И. И. и др. Некоторые результаты экспериментального исследования аэродинамики и теплообмена на поверхности с полусферическими кавернами // Сибирский физико-технический журнал.– 1992.– 5.– С. 3–9.
14. 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.
15. Афанасьев В. Н., Леонтьев А. И., Чудновский Я. П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями.– М.: МГТУ, 1990.– 118 с.
16. 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.
17. 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.
18. Кесарев В. С., Козлов А. П. Конвективный теплообмен в полусферическом углублении при обтекании турбулизированным потоком // II Минский международный форум Теплообмен, ММФ–92, т. I.– Минск: ИТМО АН Беларуси, 1992.– С. 14–18.
19. Евенко В. И., Шишков В. М., Фнисин А. К. Теплообмен и сопротивление профильной пластинчатой поверхности с коридорным расположением сфероидальных выштамповок // Транспортное машиностроение.– 1974.– 5.– С. 5–10.
20. Анисин А. К. Теплоотдача и сопротивление трубчатой поверхности с двусторонними сфероидальными элементами шероховатости // Известия Вузов. Энергетика.– 1983.– 3.– С. 93–96.
21. Бунякин А. В. Ламинарный пограничный слой при обтекании крылового профиля с круговой выемкой // МЖГ.– 1998.– N 2.– С. 52–57.
22. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– Киев: Институт технической теплофизики НАНУ, 2005.– 76 с.
23. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 5. Теплообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков.– Киев: Институт технической теплофизики НАНУ, 2005.– 500 с.
24. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Том 7. Вихревые технологии аэротермодинамики в энергетическом газотурбостроении.– Киев: Институт технической теплофизики НАНУ, 2008.– 292 с.
25. Мусиенко В. П. О формировании волн Толлмина–Плихтинга механическим вибратором // Бионика.– 1992.– Вып. 25.– С. 50–53.
26. Мусиенко В. П. Экспериментальное исследование обтекания локализованных углублений // Бионика.– 1993.– Вып. 26.– С. 31–34.
27. 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.
28. 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
29. Babenko V. V., Musienko V. P., Korobov V. I. Development of three-dimensional disturbances over concave elastic surface and with the help of spherical grooves // 11-th Int. Couette-Taylor Workshop Bremen, Germany.– 1999, 107–108.– P.
30. Babenko V. V., Musienko V. P., Korobov V. I., Пядишус А. А. Выбор геометрических параметров лунки, генерирующей возмущения в пограничном слое // Бионика.– 1998.– Вып. 27–28.– С. 42–47.

31. Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихревое движение в полцилиндрической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вестник национального технического университета Украины КПИ, Машиностроение.– 2006.– Вып. 48.– С. 79–85.
32. Babenko V. V., Voskoboynick A. V., Voskoboynick 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.
33. 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.
34. Бабенко В. В., Канарский М. В., Коробов В. И. Пограничный слой на эластичных пластинах.– К.: Наукова думка, 1993.– 264 с.
35. Kline S. J., Reynolds W. C., Schraub F. A. and Runstadler P. W. The structure of turbulent boundary layers // JFM.– 1967.– N 30.– P. 741–752.
36. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В. Экспериментальные исследования пограничного слоя.– К.: Наукова думка, 1978.– 184 с.
37. Козлов Л. Ф., Бабенко В. В., Цыганюк А. И. и др. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях.– К.: Наукова думка, 1985.– 283 с.
38. Meng J. C. S. Wall Layer Microturbulence Phenomenological Model and a Semi-Marcov Probability Predictive Model for Active Control of Turbulent Boundary layers. Self-Sustaining Mechanism of Wall Turbulence // Editor: Panton R. L.– Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA, 1997.– P. 201–252.
39. Бабенко В. В. К взаимодействию потока с эластичной поверхностью // Механика турбулентных потоков.– М.: Наука, 1980.– С. 292–301.
40. Blackwelder R. Analogies between transitional and turbulent boundary layers // Phys. Fluids.– 1983.– N 26.– P. 2807–2815.
41. Бабенко В. В. Проблема восприимчивости пограничным слоем различных возмущений // Бионика.– 1988.– Вып. 22.– С. 15–23.