

ВИЗУАЛИЗАЦІЯ ЛАМИНАРНОГО ОБТЕКАННЯ ОВАЛЬНОГО УГЛУБЛЕННЯ

Г. А. ВОРОПАЕВ*, А. В. ВОСКОВОЙНИК*,
В. А. ВОСКОВОЙНИК*, С. А. ИСАЕВ**

*Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

**Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации, Санкт-Петербург, Россия

Получено 07.05.2009

В работе представлены результаты экспериментальных исследований формирования вихревого течения внутри овальной лунки, расположенной на плоской поверхности, для ламинарного режима ее обтекания различными методами визуализации потока. Определены оптимальные параметры асимметричной овальной лунки с точки зрения наибольшей теплогидравлической эффективности и формирования устойчивых вихревых структур в ее следе, а именно: длина цилиндрической вставки равна диаметру сферического сегмента и угол расположения лунки 60° относительно направления набегающего потока. При оптимальной конфигурации лунки в ней формируется устойчивая крупномасштабная когерентная веретенообразная вихревая структура. Веретенообразный вихрь, совершая колебательное движение, то присоединяется ко дну кормовой сферической части лунки, то выбрасывается из нее. При выбросе веретенообразный вихрь принимает форму торнадообразного вихря, фокус которого находится на передней по потоку сферической стенке лунки, а сток периодически выбрасывается в пограничный слой позади кормовой сферической части лунки, формируя продольную когерентную вихревую структуру. Наиболее интенсивно выброс вихревых структур при $\alpha = 60^\circ$ наблюдается в срединной цилиндрической части овальной лунки, что обуславливает появление в ближнем следе этой части лунки максимальных уровней касательных напряжений.

У роботі представлені результати експериментальних досліджень формування вихрової течії усередині овальної лунки, розташованої на плоскій поверхні, для ламинарного режиму її обтікання різними методами візуалізації потоку. Визначені оптимальні параметри асиметричної овальної лунки з погляду найбільшої теплогидравлічної ефективності і формування стійких вихрових структур в її сліді, а саме: довжина циліндрової вставки дорівнює діаметру сферичного сегменту і кут розташування лунки 60° щодо напрямку потоку. При оптимальній конфігурації лунки в ній формується стійка великомасштабна когерентна веретеноподібна вихрова структура. Веретеноподібний вихор, здійснюючи коливальний рух, то приєднується до дна кормової сферичної частини лунки, то викидається з неї. При викиді веретеноподібний вихор приймає форму торнадоподібного вихору, фокус якого знаходиться на передній по потоку сферичній стінці лунки, а стік періодично викидається в прикордонний шар позаду кормової сферичної частини лунки, формуючи поздовжню когерентну вихрову структуру. Найінтенсивніше викид вихрових структур при $\alpha = 60^\circ$ спостерігається в серединній циліндричній частині овальної лунки, що обумовлює появу в ближньому сліді цієї частини лунки максимальних рівнів дотичних напруг.

In this paper the results of experimental researches of forming of vortical flow are presented into an oval dimple, located on a flat surface, for the laminar regime of its flowing around of different visualization methods of stream. The optimum parameters of asymmetric oval dimple are certain from point of most heat-hydraulic efficiency and forming of steady vortical structures in its wake, namely length of cylindrical insertion is equal to the diameter of spherical segment and corner of location of dimple of 60° in relation to direction of the stream. During optimum configuration of dimple a steady large-scale coherent fusiform vortical structure is formed in it. A fusiform vortex, accomplishing oscillation, both joins in with the bottom of forage spherical part of the dimple or break up from it. At the break up a fusiform vortex takes a form of tornado-like vortex, focus of which is on a front to streamwise spherical side of the dimple, and a flow is periodically break up in a boundary layer behind forage spherical part of the dimple, forming a longitudinal coherent vortical structure. Most strongly the break up of vortical structures at $\alpha=60^\circ$ is observed in middle cylindrical part of the oval dimple, that to stipulate appearance in near wake of this part of the dimple of maximal levels of shear stresses.

ВВЕДЕНИЕ

Торнадообразные или смерчеобразные вихревые струйные структуры, формируемые при обтекании выемок на плоскости, впервые были обнаружены в 70-х годах прошлого столетия группой исследователей под руководством Г.И. Кикнадзе [1, 2]. Уже в первых экспериментах результаты аэродинамических и теплофизических исследований этого явления показали высокую эффективность рельефов таких углублений с целью увеличения тепло- и массопереноса без дополнительного использования энергии на организацию движения

теплоносителя при незначительном росте уровня гидродинамических потерь в таких течениях. Явление самоорганизации вторичных торнадообразных струй сопровождается обтеканием сплошной средой поверхностей с рельефом в виде криволинейных углублений двойной кривизны (выпуклой и вогнутой), чередующихся с участками исходной поверхности. Образование криволинейных участков на обтекаемой поверхности обуславливает действие центробежных сил на набегающий поток. Появление полей центробежных сил, отсутствующих при обтекании плоской поверхности, превращает сдвиговый пограничный слой, образованный на гладкой поверхности, в трехмерный пограни-

чний слой, состоящий в углублениях из поверхностных вихрей типа вихрей Гертлера или их ансамблей, при соответствующих условиях согласно работам [3 - 6]. Действие центробежной вторичной неустойчивости внутри выемок наряду со сдвиговыми слоями и отрывом пограничного слоя, образуемыми в местах разрыва обтекаемой плоской поверхности, формируют в углублениях циркуляцию среды. С ростом скорости обтекания один из торцов вихревых структур, циркулирующих в углублениях, вытягивается вслед за потоком, образуя торнадообразные струи. Эти струи, подобно смерчам, приобретают столбообразную форму с продольным размером, существенно превышающим поперечный масштаб. Они интенсивно всасывают в свой ствол массу сплошной среды из лунки и с окружающей ее поверхности и переносят эту массу вдоль основного течения за пределы пограничного слоя [4, 6].

Исследования теплообмена на физических моделях узких каналов со сферическими лунками на стенках свидетельствуют о привлекательности этого способа интенсификации теплообменных процессов для устройств различного технологического назначения [1, 7 - 10]. Использование луночных ансамблей с соответствующими параметрами позволило существенно улучшить функциональные и технико-экономические характеристики урановых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с повышенной в разы теплоотдачей за счёт рельефа лунок при практически неизменном гидравлическом сопротивлении по сравнению с гладкостенными ТВЭЛами. Интенсифицирован теплообмен, уменьшены весо-габаритные характеристики и повышен КПД воздухоподогревателей для мощных газотурбинных установок, котлов-утилизаторов тепла и водогрейных котлов [6]. Торнадообразная струйная технология нашла применение при изготовлении лопаток авиационных газотурбинных двигателей, где охлаждаемые лопатки газовой турбины со смерчевым охлаждением увеличили взлетную тягу двигателя [11]. В автомобилестроении используются защитные экраны с рельефом лунок, устанавливаемых на днища автомобилей VOLKSWAGEN, AUDI и LEXUS для снижения аэродинамического сопротивления и уменьшения шума, адсорбции пыли и грязи. Нанесение ансамбля лунок, генерирующих торнадообразные вихревые системы, на модель скоростного экспресса, которая была исследована в аэродинамической трубе в Германии, позволило на 17% снизить полное аэродинамическое сопротивление модели. Применение рельефа лунок на обтекаемой поверхности крыловидного про-

филя CLARK-Y дало возможность значительно улучшить аэродинамические качества крыла за счёт увеличения его подъёмной силы и существенного снижения сопротивления [6]. Удаётся предотвратить кавитационное разрушение поверхностей за счёт формирования вторичных смерчеобразных струй и эвакуации парогазовых образований за пределы обтекаемой поверхности, а также повысить критические тепловые нагрузки в жидких теплоносителях за счёт самоорганизации вторичных смерчеобразных струй в кипящих и закритических потоках жидкости, обтекающих поверхности с рельефами лунок [6]. В последние годы открываются новые перспективы применения луночных технологий, в частности, в микроканалах для решения задач охлаждения приборов микро- и нанoeлектроники [12 - 14].

Существование нестационарных циклических процессов формирования и эволюции вихревых потоков обуславливает высокий уровень теплоотдачи при сравнительно низких гидродинамических потерях. Управление процессами такого типа крайне затруднительно из-за того, что их реализация существенно зависит от сочетания многих факторов: относительной глубины лунок и радиуса закругления их кромок, режима обтекания, толщины пограничного слоя на передней кромке углубления, степени турбулизации набегающего потока и взаимного расположения лунок в их ансамбле на обтекаемой поверхности.

Как отмечалось в работах [15], обтекание сферической лунки на плоскости характеризуется захватом окружающих пристеночных слоев жидкости, то есть линии тока на боковых ее склонах искривляются. Такое поведение потока продиктовано падением избыточного давления перед вогнутостью, следствием которого является ускорение течения. Наиболее выраженным этот процесс оказывается для мелкой, близкой к безотрывной впадины, где отношение глубины лунки не превышает 0.06 диаметра пятна углубления на обтекаемой поверхности.

Торможение потока в мелкой лунке (отношение ее глубины к диаметру порядка 0.06) сопровождается образованием тонкого отрывного пузыря, подобно обтеканию траншеи той же глубины [16]. В сферической лунке линия присоединения располагается несколько выше центра вогнутости [17]. Фактически на картине растекания жидкости внутри лунки эта линия отображается отрезком распределенных источников, часть жидких частиц от которых следует навстречу набегающему потоку, а поведение противоположного семейства траекторий частиц, покрывающих наветренный склон,

аналогично струйному течению за соплом. В результате в пределах лунки формируется весьма компактная пространственная область возвратно-циркуляционного движения жидкости с линией отрыва окружной формы, расположенной на подветренном склоне несколько ниже ее переднего края [17].

При обтекании глубоких лунок (порядка $0.2d$) формируются моносмерчевые структуры, транспортирующие жидкость в поперечном направлении (максимальная скорость такого переноса оказывается порядка 0.2 скорости набегающего потока) [16–19]. Анализ картин обтекания луночного рельефа показал, что внутри лунок формируются асимметричные вихревые структуры, подобные тем, которые наблюдаются в глубокой одиночной сферической лунке [19]. Следует отметить, что пространственная топология турбулентного течения в глубокой сферической лунке резко контрастирует с обтеканием траншеи на плоскости той же глубины, хотя распределения статического давления в срединном сечении и интенсивности возвратного течения в двумерном и трехмерном случаях оказываются почти одинаковыми [17, 20]. Однако глубокая сферическая лунка заметно сильнее турбулизирует поток, но для мелкой лунки наблюдается обратная ситуация. При внезапном формировании глубокой лунки (альтернативный вариант постепенному увеличению ее глубины) в ее пределах образуется моносмерчевая вихревая структура, в которой жидкость транспортируется в поперечном направлении лунки под углом примерно 45° , что коррелирует с экспериментальными наблюдениями [например, 2, 10, 21, 22]. Анализ распределений локального коэффициента относительной теплоотдачи в срединном продольном сечении сферической лунки глубиной 0.22 иллюстрирует интенсификацию теплообмена при перестройке вихревой структуры течения. Асимметричной вихревой картине соответствует почти двукратный рост максимальной величины локального числа Нуссельта, в пять раз превышающей уровень теплоотдачи для гладкой стенки. Одновременно в самой лунке на подветренной стороне тепловые нагрузки оказываются меньше, чем для гладкой стенки [17].

Как отмечалось в работах [23, 24], сферические выемки по теплогидравлической эффективности не являются наилучшими в турбулентном режиме течения теплоносителя, а в ламинарном режиме их использование практически не оправдано. Расчеты [24] показывают, что относительный теплоотвод от окрестности сферических лунок заметно ниже, чем от овальных углублений. Способность

овальных лунок создавать вихревые структуры с интенсивным вторичным течением предопределяет их преимущество и обеспечивает работоспособность на ламинарном режиме течения.

В некоторых экспериментальных работах (см., например, [25]) исследовались асимметричные каплеобразные формы лунок с сильным закруглением кромки ниже по потоку с точки зрения снижения гидродинамических потерь. В ряде работ [18, 26, 27] изначально наблюдалось стремление исследовать предпосылки к формированию мощного вторичного течения в пристеночном слое за счет искривления боковых скатов лунки. Известно, что течение в симметричных струйно-вихревых структурах оказывается слабым и неустойчивым, и чтобы его интенсифицировать, следует сделать обтекание несимметричным. Поэтому для достижения этого было предположено создать асимметрию формы лунки. Сначала она создавалась аналитически за счет изменения радиуса закругления кромки по окружной координате, при этом пятно лунки [27] представляло собой круг аналогично пятну сферической лунки. Затем круговая боковая половина лунки была заменена на эллиптическую и, таким образом, рассматривалась лунка с эксцентриситетом [19, 28].

В работах [18, 26] продемонстрировано, что односторонняя поперечная деформация глубокой лунки (эллиптичность боковой поверхности $\epsilon = 0.2$) существенно видоизменяет вихревую картину внутри нее и вызывает интенсификацию движения в лунке поперек набегающего потока. Обнаружено, что при ламинарном режиме обтекания сохраняется вихревая структура течения с двумя крупномасштабными вихревыми ячейками, обнаруженная для сферических лунок [29]. При турбулентном режиме оказывается возможным переход к моновихревой торнадообразной или смерчевой структуре потока в асимметричной лунке. Наряду с этим наблюдается существенная интенсификация поперечного течения внутри лунки, что сопровождается значительным увеличением скорости вторичного течения. Для рассматриваемой в работе [19] асимметричной лунки ($\epsilon = 0.2$) картина растекания жидкости имеет явно несимметричный характер со скосом потока в сторону ее деформированной части и смещением максимума давления в противоположную сторону. На сферической части лунки картина течения подобна той, которая наблюдается для симметричной глубокой сферической лунки при ламинарном режиме обтекания. Она характеризуется наличием особой точки типа фокус или исток, которая расположена на боковой стенке лунки ближе к ее передней

части. В окрестности нее формируется пристеночный закрученный струйный поток. Структура крупномасштабного когерентного вихревого течения внутри асимметричной лунки имеет улиткоподобный вид с моновихревым смерчем. Это особенно отчетливо проявилось в работе [19] при анализе траекторий движения меченых частиц, вводимых в различных точках пространства. Отрывная зона оказалась разомкнутой, как и в случае ламинарного обтекания асимметричной лунки [26, 27]. При этом через открытое боковое окно со стороны сферической части лунки набегающий поток попадает внутрь лунки, что позволяет существенно интенсифицировать вихревое движение жидкости в асимметричной лунке. Поэтому наличие бифуркации в случае симметричной вихревой картины значительно снижает теплоотдачу луночного рельефа, что необходимо учитывать при построении энергосберегающих технологий, использующих луночные ансамбли, как одно из средств управления пограничным слоем.

Другая логика построения асимметричных лунок обусловлена принципами преднамеренной организации вихревой структуры в пределах лунки. Асимметрия формы лунки за счет ее боковой деформации позволяет трансформировать вихревую структуру и усилить поперечное перетекание жидкости в ее пределах. Определенный прогресс в формообразовании лунок, приводящих к их асимметричному обтеканию, связывается с разделением сферической лунки на две половины и разнесении их на некоторое расстояние друг от друга с помощью цилиндрической вставки [30–32]. Длина цилиндрической вставки и угол наклона продольной оси симметрии лунки (к внешнему потоку) являются их дополнительными геометрическими характеристиками помимо относительной глубины и радиуса закругления, что в большей мере позволяет управлять процессом обтекания таких лунок.

Придание неглубокой лунке асимметричной формы приводит к перестройке ее обтекания. Двухъячеистая вихревая структура в лунке меняется на моновихревую смерчеобразную. Перестройка сопровождается перераспределением тепловых нагрузок в пределах лунки и за ней. Анализ поля вторичного течения показывает, что за асимметричной лункой также формируется моновихревая спиралеобразная структура течения, в отличие от симметричной двухвихревой структуры за сферической лункой. Как результат, для асимметричной лунки, сочетающей неглубокую сферическую лунку с цилиндрической вставкой, имеет место существенное (порядка 10%) увеличение теплоотдачи от стенки. Следует отметить

высокую устойчивость самогенерирующейся смерчевой структуры, обеспечивающую стабильность эффекта вихревой интенсификации теплообмена.

Как показано в работе [14], овальные лунки, расположенные на стенке узкого микроканала, в отличие от сферических выемок, способны интенсифицировать теплообмен, увеличивая теплоотдачу примерно на 10%. За счет снижения гидравлических потерь теплогидравлическая эффективность возрастает еще выше - до 13%. Анализ продольных и поперечных распределений относительной теплоотдачи в срединных сечениях показывает, что указанная тенденция для осредненных величин справедлива, в общем, и для локальных характеристик. По мере роста числа Рейнольдса увеличивается зона пониженных тепловых нагрузок в центральной части овальной лунки, постепенно распространяясь на участки впереди и в следе за лункой. Область интенсификации теплообмена располагается сбоку от срединного сечения (ближе к передней части углубления). Причем при $Re_d = 2500$ максимум осредненной по продольной полосе теплоотдачи двукратно превышает соответствующие величины для плоского канала. Течение в пристеночной области пограничного слоя интенсифицируется по мере возрастания Re . В работе [14] установлены оптимальные режимы ламинарного течения в микроканале с овальными лунками ($Re_d = 1500$ и 700), при которых тепловая и теплогидравлическая эффективность имеют максимальные значения.

Результаты исследований [30] показали, что расположение овальных лунок в один ряд в микроканале (лесенкой или зигзагом) и особенно образование эксцентриситета относительно срединной плоскости могут кардинально изменить распределение тепловых нагрузок. Наилучшим вариантом оказался зигзагообразный рельеф со смещением центров лунок на $0.3d$, для которого интенсификация теплообмена (на 90%) сопровождается 25% ростом гидравлических потерь по отношению к узкому плоскопараллельному каналу.

Учитывая важность практического использования луночных рельефов на обтекаемой поверхности с целью управления пограничным слоем для реализации энергосберегающих технологий во многих отраслях науки и техники, необходимо изучить механизмы вихреобразования внутри обтекаемых углублений и выявить их гидродинамические особенности. Создание вихрегенераторов, которые имели бы минимальное гидродинамическое сопротивление и генерировали бы искусственные вихревые системы с заданными кинематическими и динамическими параметрами, воз-

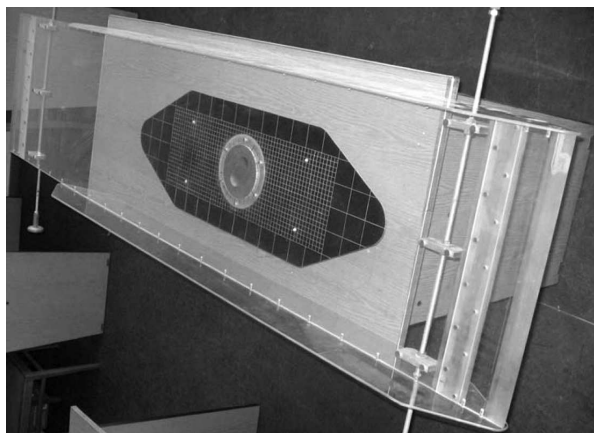


Рис. 1. Измерительная плоская пластина с овальным углублением

можно, как показывают последние научные исследования, при использовании овальных углублений умеренной глубины. В связи с этим была поставлена цель экспериментально изучить гидродинамические особенности формирования и эволюции вихревых структур в овальных углублениях и определить их степень воздействия на пограничный слой и поля пульсаций скорости и давления, генерируемые вихревыми структурами вблизи подобных неоднородностей обтекаемой поверхности. Одним из этапов этих исследований является визуализация вихревого течения и определение характерных особенностей вихревого движения жидкой среды в овальных лунках и их окрестностях, результаты которой будут использованы при проведении инструментальных измерений количественных параметров.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом канале с открытой поверхностью потока. Вода в канал длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной до 1 м подавалась с помощью центробежных насосов через отстойную камеру, конфузور, спрямляющие и турбулизирующие поток хонейкомбы и решетки. Сброс воды из гидродинамического канала осуществлялся посредством подъемных щитов и заслонок, которые позволяли регулировать уровень воды в канале. Вода сбрасывалась в резервуар, который располагался под помещением гидравлической лаборатории, откуда ее качали насосы для проведения исследований. Таким образом, температура воды в ходе

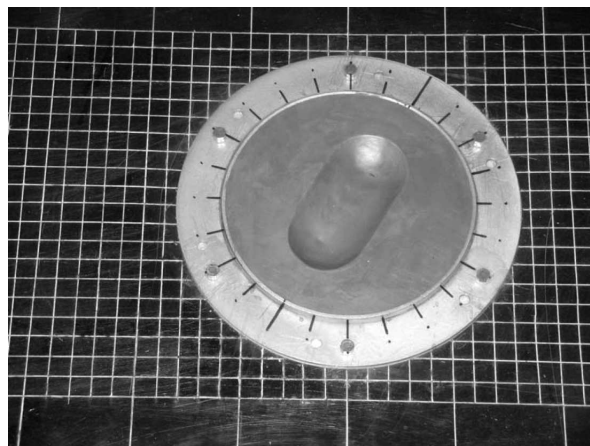


Рис. 2. Овальная лунка в виде сферических сегментов, соединенных цилиндрической вставкой

экспериментов оставалась неизменной, что является важным при проведении измерений скорости термоанемометрами и термисторными датчиками. Система сброса воды из гидродинамического канала была оборудована средствами и приспособлениями по снижению уровней шумов гидродинамического и акустического характера, что обеспечивало достижения приемлемой помехозащищенности экспериментальных данных.

Конструкция и оборудование гидродинамического канала позволяют в широких пределах регулировать скорость потока, его уровень и степень турбулентности. Наличие разнообразных приспособлений и координатных устройств, а также поддерживающих хорошо обтекаемых элементов и ножей дает возможность точно, в соответствии с расчетными значениями, устанавливать исследуемые модели, измерительные приборы, инструменты и датчики. Прозрачные стенки гидродинамического канала, изготовленные из толстого противоударного стекла, обеспечивают проведение качественных визуальных исследований. Использование соответствующей видео- и фотоаппаратуры дает возможность зарегистрировать видеоизображения, которые в последующем обрабатываются и анализируются на персональных компьютерах.

Гидравлически гладкая пластина, изготовленная из полированного органического стекла толщиной 0.01 м, шириной 0.5 м и длиной 2 м, была заострена с одной (фронтальной) и с другой (кормовой) стороны для обеспечения безотрывного ее обтекания. К боковым сторонам пластины крепились концевые шайбы (органическое стекло толщиной 0.005 м и шириной 0.2 м). На расстоянии 0.8 м от носка пластины находилось отвер-



Рис. 3. Расположение исследуемой пластины с овальной лункой в гидродинамическом канале

стие, где устанавливался стальной полый стакан, заполненный пластилином, в котором было сделано овальное углубление в виде двух сферических лунок, объединенных цилиндрической вставкой. К нижней части пластины, в месте расположения стакана с овальным углублением, крепился лист с масштабной сеткой и пенопластовый обтекатель (рис. 1). Диаметр лунки $d=0.04$ м, ширина и длина цилиндрической вставки по 0.04 м. Таким образом, овальная лунка имеет ширину 0.04 м, длину 0.08 м, а глубину 0.009 м и отношение глубины к ширине $h/d=0.22$ (рис. 2). Крепление стального стакана дало возможность вращать овальное углубление вокруг своей оси с произвольным шагом. Угол расположения овального углубления (α) относительно направления набегающего потока в проведенных исследованиях варьировался от 30 до 90° и скорость потока изменялась от 0.1 до 0.5 м/с. Глубина воды в гидродинамическом канале составляла 0.4 м, а измерительный участок находился по середине канала (рис. 3).

Особенности формирования и эволюции вихревых структур и циркуляционного течения внутри овального углубления для различных углов расположения его относительно направления потока визуально исследовались с помощью нанесения контрастных покрытий на обтекаемую поверхность и красящих веществ, которые вводились в набегающий поток. В качестве контрастного смываемого покрытия использовалось сгущенное молоко (плотность которого в 1.3 выше, чем плотность воды), наносимого равномерным слоем на

поверхности пластины либо наливаемого на нее. Нанесение смываемого покрытия на исследуемую пластину в гидродинамическом канале дало возможность определить зоны повышенных касательных напряжений и области действия вихревых систем, выбрасываемых из углубления. Исследования визуализации потока с помощью смываемых покрытий проводились для скорости течения 0.1 , 0.25 и 0.5 м/с. Для каждой скорости потока готовилось отдельное покрытие и пластина со смываемым покрытием устанавливалась на дно канала после того, как наступал установившийся скоростной режим. Кроме покрытий, была использована подача красящих веществ и меченых частиц через трубку малого диаметра, вводимую в пограничный слой перед углублением либо внутрь углубления. В наших исследованиях красящий раствор и меченые частицы имели плотность, близкую к плотности воды, и их движение в пространстве отображало особенности вихревого потока внутри овального углубления и вблизи него.

Оценка поведения подкрашенной жидкости внутри лунки и в ее окрестности дала возможность качественно определить характерные особенности вихревого течения внутри исследуемых углублений. Обработка и анализ траекторий движения меченых частиц позволила определить направление движения и скорость переноса их в изучаемых потоках. Погрешность измерения скорости движения меченых частиц и подкрашенной жидкости составляет порядка 12% при доверительном интервале 0.95 .

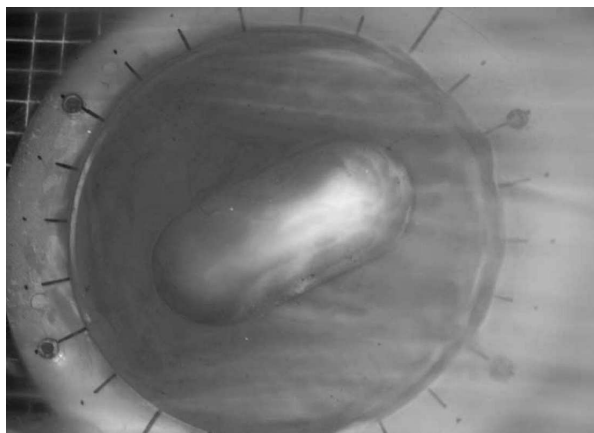


Рис. 4. Перемещение контрастного вещества внутрь овальной лунки при скорости обтекания 0.1 м/с ($\alpha = 30^\circ$). Направление потока справа налево

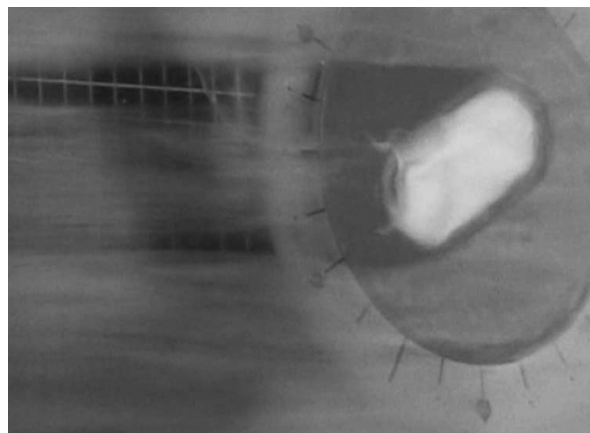


Рис. 5. Выброс контрастного вещества наружу из овальной лунки при скорости обтекания 0.1 м/с ($\alpha = 30^\circ$)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения осредненной и пульсационной составляющих скорости пленочными термоанемометрами и термисторными датчиками скорости перед овальным углублением на удалении 1.3 его диаметра от центра углубления показали, что профиль скорости с достаточной степенью точности соответствует ламинарному режиму течения (профиль Блазиуса) для скорости набегающего потока 0.1 м/с. Для ламинарного обтекания овальной лунки числа Рейнольдса, рассчитанные по длине пластины до передней кромки углубления и по диаметру углубления, составляют $Re_x = 8 \cdot 10^4$ и $Re_d = 4 \cdot 10^3$ соответственно. Перед углублением толщина ламинарного пограничного слоя равна $\delta = 0.014$ м, толщина вытеснения $\delta^* = 0.005$ м, а толщина потери импульса $\theta = 0.002$ м для исследуемого ламинарного режима обтекания овального углубления ($U_\infty = 0.1$ м/с).

Визуальные исследования особенностей формирования и развития вихревого течения внутри овального углубления и взаимодействия его с ламинарным пограничным слоем над плоской пластиной показали ряд закономерностей эволюции течения в лунке в зависимости от угла расположения овального углубления. Так, для угла обтекания $\alpha = 30^\circ$ контрастное вещество заходит внутрь лунки вдоль ее передней полуокружности и цилиндрической части, которые сопрягаются друг с другом (рис. 4). Отрывной области за передним краем углубления не наблюдается и внутри лунки контрастное вещество не совершает вращательного либо циркуляционного движения, а ко-

леблется вдоль продольной оси углубления. Длина волны колебательного движения внутри овального углубления приблизительно равна диаметру лунки, а частота соответствует частоте выброса жидкости наружу из углубления. Перед выбросом верхняя часть жидкости в углублении (на уровне плоскости пластины) совершает осцилляции в виде пакета бегущих волн (в среднем (3:4) волны). Фронт бегущих волн перпендикулярен направлению потока и их длина волны составляет почти половину диаметра лунки. Волны переносятся со скоростью порядка $(0.4-0.5)U_\infty$.

Выброс жидкости из овального углубления наблюдается над задней или кормовой по потоку сферической частью лунки с частотой, близкой к (0.12–0.15) Гц, которой отвечает число Струхала ($St = 0.05-0.06$). При этом контрастное вещество выносится в пограничный слой пластины над областью сопряжения кормовой цилиндрической и сферической части лунки, а также над точкой сопряжения продольной оси углубления и его верхним сферическим краем в кормовой части (см. рис. 5). Таким образом, выброс жидкости из лунки происходит над кормовой сферической частью углубления, составляющей ее четверть окружности. В процессе выброса часть жидкости, которая находится ниже уровня пластины, ударяется в кормовую стенку и перемещается по ее сферической поверхности ко дну в виде пристеночной струи, несколько сворачивая придонную область потока внутри кормовой сферической части лунки. Выброшенная жидкость в основном выносится до середины толщины пограничного слоя, но иногда и до его верхней границы и переносится параллельно продольной оси пластины в следе кормовой

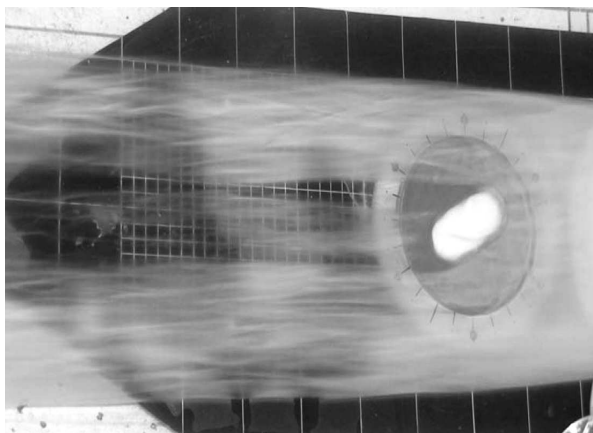


Рис. 6. Перемещение контрастного вещества вдоль пластины с овальной лункой при скорости обтекания 0.1 м/с ($\alpha = 30^\circ$)

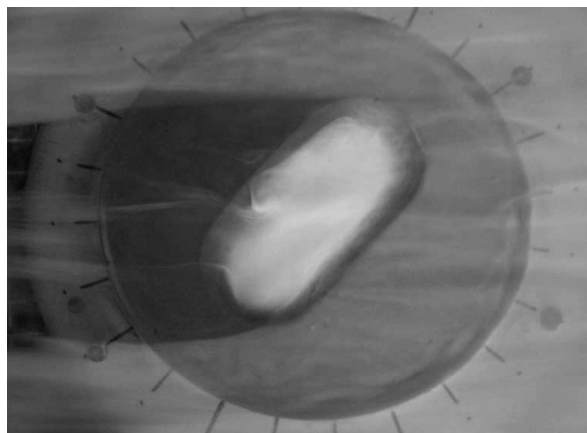


Рис. 7. Формирование веретенообразного вихря внутри овального углубления при скорости обтекания 0.1 м/с и $\alpha = 45^\circ$

части овальной лунки, расположенной под углом 30° , что проиллюстрировано на рис. 6. След контрастного вещества прослеживается на удалении порядка $(8 \div 10)$ диаметров овального углубления.

При обтекании овального углубления, расположенного под углом 45° к направлению потока, поступление контрастного вещества, имеющего отрицательную плавучесть, происходило вдоль передней цилиндрической части лунки и почти трех четвертей окружности сферической части. Входящая в углубление жидкость сворачивается в веретенообразный вихрь, который располагается в придонной части лунки вдоль ее продольной оси (рис. 7). Частота вращения этого вихря очень низкая, и он занимает почти весь объем лунки. Верхняя часть этого вихря, соприкасающаяся со слоем смещения, интенсивно колеблется в трех плоскостях, что отражается и на его осцилляциях в придонной области, интенсивность которых незначительная. Сдвиговый слой в месте сопряжения с веретенообразным вихрем совершает интенсивные поперечные колебания, практически параллельно продольной оси лунки. Синфазные колебания сдвигового слоя и веретенообразного вихря приводят к формированию пучностей и впадин, которые перемещаются в направлении потока, а также, в основном, вдоль кормовой стенки лунки от передней по потоку сферической ее части к кормовой сферической части.

Когда интенсивные пучности приближаются к кормовой стенке углубления, то они выносятся частично потоком наружу из лунки в виде выбросов, а частично ударившись в кормовую стенку, устремляются вдоль нее в придонную область по спиральной траектории, формируя веретенообра-

зный вихрь. Выброс жидкости в срединном сечении овальной лунки показан на рис. 7, а над ее кормовой сферической частью – на рис. 8. При выбросе из кормовой области нередко происходит отрыв части веретенообразного вихря и вынос оторвавшейся вихревой структуры в пограничный слой позади лунки, что генерирует относительно мощный выброс. Частота выбросов в обеих ранее упомянутых областях овальной лунки, установленной под углом 45° к направлению потока, происходит попеременно с частотой порядка 0.14 Гц, которой отвечает число Струхала $St=0.056$, но иногда выбросы наблюдаются синхронно.

Контрастное вещество (сгущенное молоко), из-за своей повышенной плотности (в 1.3 раза выше воды), равномерно располагается в углублении почти до его половины глубины и заходит в углубление, находящееся под углом 60° относительно направлению потока, в виде сползающего течения вдоль всей передней кромки, а также вдоль ближней по потоку передней боковой сферической стенки. Верхняя часть слоя сгущенного молока, находящаяся внутри углубления, совершает колебательные движения поперек углубления (параллельно его продольной оси). Вблизи кормовой стенки появляются продольные колебания (по длине углубления). При этом жидкость, совершая колебательные движения, перемещается вдоль кормовой стенки от его передней по потоку части к кормовой. При взаимодействии колебательных движений жидкости внутри углубления в его верхней части формируются пучности в передней по потоку сферической части углубления, в его середине и в дальней или кормовой сферической части углубления. Формирование поперечно-

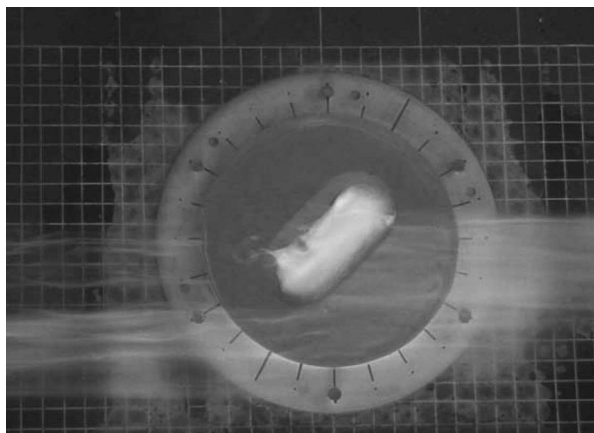


Рис. 8. Выброс жидкости из кормовой сферической части овального углубления при скорости обтекания 0.1 м/с и $\alpha = 45^\circ$

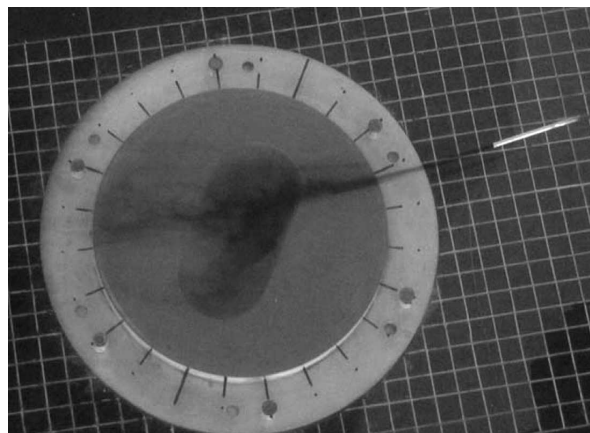


Рис. 9. Формирование веретенообразного вихря внутри овального углубления при скорости обтекания 0.1 м/с и $\alpha = 60^\circ$

го колебания, движущегося параллельно продольной оси углубления, обусловлено генерацией вихревых структур в слое смешения. В то же время, формирование продольных колебаний, движущихся вдоль кормовой стенки углубления от его передней части к дальней, обусловлено особенностями установки углубления относительно набегающего потока ($\alpha = 60^\circ$), концевыми эффектами боковых стенок углубления и их формой (сферической). Взаимодействие этих двух ортогональных колебательных процессов внутри углубления генерирует автоколебательное движение жидкости в углублении с почти синхронным формированием пучностей в передней, средней и дальней по потоку частях углубления. Визуализация потока дает основание предположить, что частота продольного колебательного движения почти в три раза меньше, чем частота поперечных колебаний или частота формирования вихревых структур в дивергентном слое.

В придонной части углубления формируется медленно вращающаяся крупномасштабная вихревая структура в виде веретенообразного вихря, ось которого изгибается и направлена вдоль продольной оси овального углубления, что проиллюстрировано на рис. 9. Источник этого вихря располагается на дне передней по потоку сферической части лунки, а сток, совершая колебательное движение, то присоединяется ко дну кормовой сферической части лунки, то выбрасывается из нее, когда происходит выброс жидкости из лунки в виде асимметричной торнадообразной вихревой системы. Жидкость в веретенообразный вихрь поступает по спирали, двигаясь, в основном, от передней части лунки к ее кормовой части вдоль дна

углубления.

Наличие пучностей в верхней части углубления (в плоскости пластины) приводит к образованию выбросов жидкости из углубления в виде петель или шпилькообразных вихрей (см. рис. 10) при достаточной интенсивности автоколебательного движения в средней части углубления. Установлено, что выбросы крупномасштабных вихревых структур происходят из средней части углубления (0.09 Гц и $St=0.04$, см. рис. 15) и дальней по потоку его части ((0.08...0.1) Гц и $St=(0.03...0.04)$, см. рис. 11). В ближней части углубления выбросов, практически, не наблюдалось, по всей видимости, из-за незначительной интенсивности колебательного движения в этой области углубления.

Результаты исследований показали, что наиболее интенсивный выброс вихревых систем из углубления для данного режима обтекания ($U_\infty=0.1$ м/с и $\alpha = 60^\circ$) наблюдается в его средней части, что привело к большему смыву контрастного покрытия позади углубления в этой области. Установлено, что площадь смытого покрытия в средней части углубления в 1.5 раза больше, чем у его дальней части, и в 3 раза больше, чем у передней по потоку части углубления (см. рис. 12). Исходя из этого, можно предположить, что касательные напряжения в ближнем следе углубления для данного режима обтекания пропорциональны площади смытого покрытия и имеют наибольшие значения в его средней части. Скорость смыва покрытия в средней части углубления составляла около $50 \cdot 10^{-6}$ м/с.

При ориентации овального углубления поперек набегающего потока (для скорости обтекания 0.1 м/с) наблюдается неинтенсивное колеба-

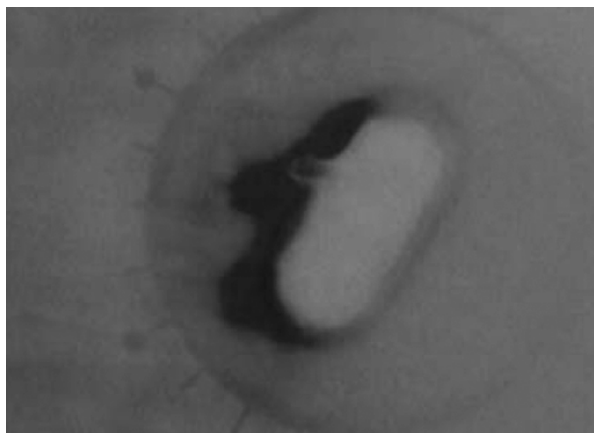


Рис. 10. Выброс жидкости из средней части овальной лунки в виде шпилькообразного вихря при скорости обтекания 0.1 м/с ($\alpha = 60^\circ$)

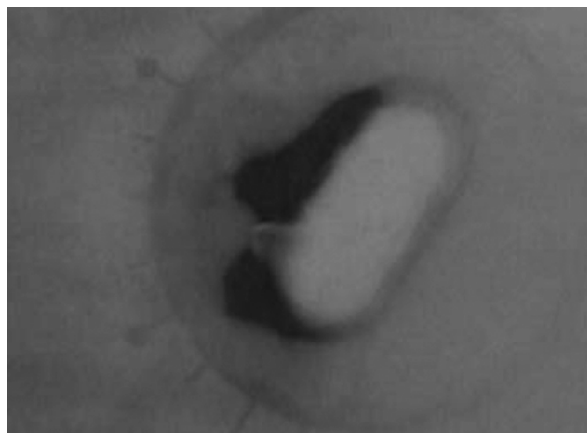


Рис. 11. Размыв контрастного покрытия позади овального углубления при выбросе с кормовой его части при скорости обтекания 0.1 м/с и $\alpha = 60^\circ$

ние жидкости внутри лунки, в основном в поперечной плоскости углубления (в зоне взаимодействия сдвигового слоя с жидкостью, находящейся внутри лунки). Заполнение углубления контрастным веществом отрицательной плавучести наблюдается вдоль передней части симметрично ее поперечной оси, что показано на рис. 13. Внутри лунки вращательное движение жидкости не наблюдается, а только вяло протекающее осциллирующее движение, несколько интенсивнее вблизи кормовой стенки. Здесь колебания имеют трехмерный характер, и некоторые пучности колебательного движения поверхности внутренней жидкости выносятся за пределы лунки. Как показывает анализ видеоматериала визуализации исследуемого режима обтекания пластины с овальным углублением ($\alpha = 90^\circ$), маломощный вынос или выброс жидкости из лунки наблюдается вдоль всей кормовой цилиндрической части лунки хаотически и не часто. Взаимодействие пограничного слоя, образованного над пластиной перед овальным углублением, расположенным перпендикулярно набегающему потоку, с жидкостью, заполняющей внутренний объем лунки, происходит неинтенсивно, вследствие маломощных выбросов последней, что проиллюстрировано на рис. 13. Подкрашенная жидкость, проходя над углублением, по сути, не изменяет своего поведения, отражая отсутствие взаимодействия между пограничным слоем и внутренним течением в овальном углублении. Следовательно, при таком расположении лунки и режиме ее обтекания, практически, не происходит обмена энергией между течением внутри лунки и вне нее, то есть в овальной лунке реализуется автономное течение, имеющее не-

сколько осциллирующий характер, что согласуется с результатами численного моделирования ламинарного обтекания поперечной канавки [33, 34].

3. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные экспериментальные исследования с использованием нескольких методов визуализации потока позволили определить ряд характерных особенностей формирования течения внутри овальных углублений и в их области следа для ламинарного режима обтекания. Многолетний опыт использования луночных рельефов на обтекаемой поверхности, о чем ранее упоминалось, показывает, что придание асимметричного обтекания выемок с организацией поперечного течения относительно направления набегающего потока имеет определенные преимущества при создании энергосберегающих технологических процессов. Как указано в ряде работ [17, 28, 30–33], обобщающий подход к проблеме конструирования рельефов, обладающих повышенной теплоотдачей за счет генерирования высокоинтенсивных смерчеобразных вихревых структур, возник на основе сравнительного анализа двумерных и пространственных конфигураций криволинейных вогнутостей, таких как траншеи и лунки. Этот подход реализовался в так называемых траншейных или овальных лунках, то есть фактически в асимметричных лунках с цилиндрическими вставками. Но если первоначально эти формы вогнутостей появились как технологически улучшенные конфигурации эллиптических лунок, то теперь они

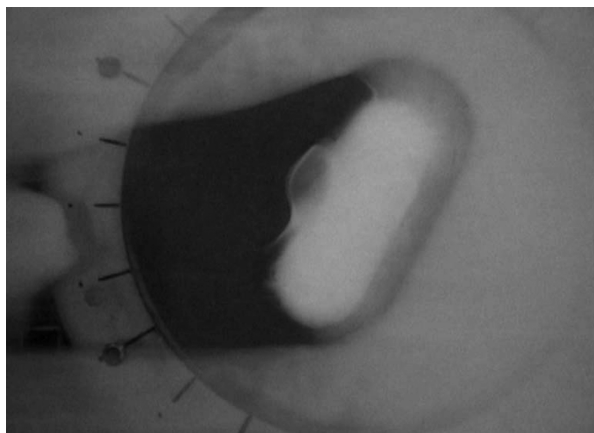


Рис. 12. Размыв контрастного покрытия позади овальной углубления при скорости обтекания 0.1 м/с и $\alpha = 60^\circ$

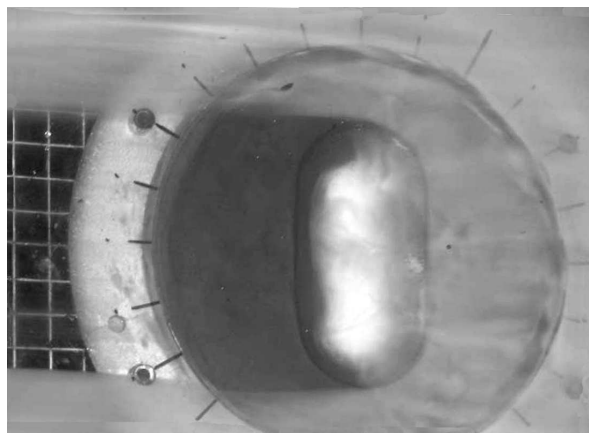


Рис. 13. Заполнение контрастным веществом овальной лунки при $U_\infty = 0.1$ м/с и $\alpha = 90^\circ$

возникли как результат перехода от двумерных траншей к трехмерным кавернам конечного размаха ($L + d$), где L – обозначает длину цилиндрической вставки овальной лунки.

Результаты численного и физического моделирования вихревого движения внутри локальных углублений и их ансамблей показывают [17, 32–38], что обтекания сферической и траншейной лунок существенно различаются. Для последних характерно образование прогрессирующей с ростом L зоны практически двумерного отрывного течения в центральной части лунок [17, 33]. При этом крайние, удаленные от срединной плоскости зоны растекания жидкости на боковых склонах симметричны, содержат особые точки типа фокуса и мало отличаются друг от друга по мере увеличения размаха. В этом плане движение в пределах сферической неглубокой лунки, как отмечалось в работах [15, 39], носит трехмерный характер.

В овальной лунке, независимо от длины цилиндрической вставки, согласно расчетам, проведенным в работе [17], в зоне вогнутости возникает неравномерное распределение локальных тепловых нагрузок. В подветренной части лунки имеет место снижение теплоотдачи по сравнению с плоской стенкой, в то время как на наветренной плоскости реализуется пик нагрузок, который в $(2 \div 2.5)$ раза превосходит уровень тепловых потоков на плоскости. Аналогичная ситуация возникает на боковых склонах лунки. Например, в областях, прилегающих к кромкам овальной лунки, имеющей длину цилиндрической вставки, превышающую диаметр лунки, локальные тепловые потоки примерно на 15% выше, чем на эквивалентной плоской стенке. В ее сферических сегментах – на 25% ни-

же, чем уровень теплоотдачи на цилиндрической части лунки [17]. При этом наиболее эффективными в теплогидродинамическом смысле являются овальные лунки, которые имеют длину цилиндрической вставки, равную диаметру пятна лунки, спроецированного на плоскую поверхность.

Результаты экспериментальных исследований на базе визуальных и инструментальных измерений показали, что при ламинарном режиме обтекания при определенных углах расположения овального углубления относительно направления потока возникают условия, необходимые для формирования веретенообразного вихря внутри лунки. Этот вихрь переносит жидкость от передней по потоку сферической части лунки к его кормовой сферической части, что наиболее отчетливо наблюдалось при угле $\alpha = 60^\circ$ (см., например, рис. 9). Результаты численного моделирования вихревого движения внутри овальной лунки удлинением 2 и относительной глубиной $0.35 d$ для числа Рейнольдса $Re_d = 4000$ показали, что внутри лунки формируется веретенообразная вихревая система, имеющая источник на передней сферической части лунки. Веретенообразный вихрь, подобно экспериментальным наблюдениям, располагается вдоль продольной оси в придонной области овальной лунки. Позади отрывной кромки лунки вдоль ее верхней части передней цилиндрической стенки жидкость перемещается из кормовой области в переднюю сферическую часть, что коррелирует с визуальными исследованиями. Выброс веретенообразной структуры, как показывают расчеты, происходит над кормовой частью овальной лунки, расположенной под углом 60° к набегающему потоку, что проиллюстрировано на рис. 15.

Как показали визуальные исследования, верете-

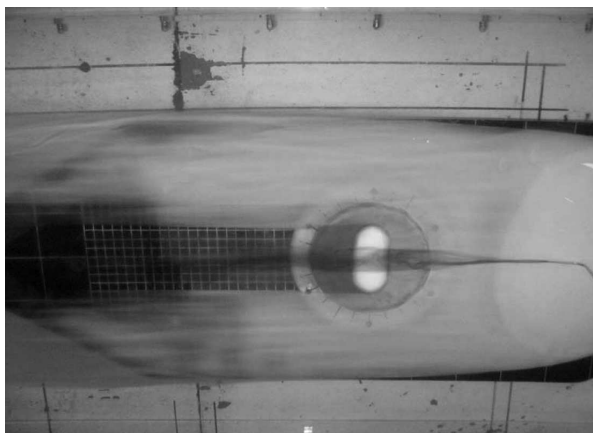


Рис. 14. Визуализация взаимодействия набегающего потока с внутренней структурой овальной лунки ($U_\infty=0.1$ м/с и $\alpha = 90^\circ$)

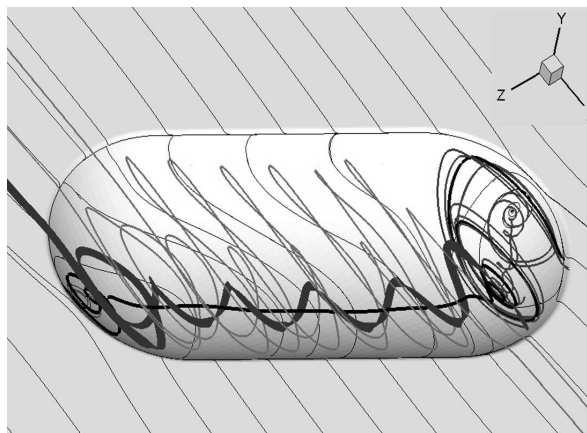


Рис. 15. Численное моделирование вихревого движения внутри овальной лунки глубиной $0.35d$ для $Re_d = 4000$ и $\alpha = 60^\circ$

нообразная вихревая структура, формируясь при угле поворота овального углубления $\alpha = 45^\circ$, вырождается при поперечном расположении лунки ($\alpha = 90^\circ$). Таким образом, в ходе экспериментальных визуальных исследований и численного моделирования установлено, что источник веретенообразного вихря располагается на дне передней по потоку сферической части лунки, а сток периодически присоединяется к кормовой сферической части лунки либо выбрасывается наружу из углубления. При выбросе вихревая структура приобретает форму торнадообразного вихря, прикрепленного к передней сферической части лунки, и его тело простирается вдоль цилиндрической части лунки, совершая, кроме вращательного движения по спиральной траектории, также колебательное движение. Установлено, что частота выброса торнадообразного вихря из кормовой части лунки для ламинарного режима обтекания ($U_\infty=0.1$ м/с и $Re_d=4000$) составляет почти 0.1 Гц или $St=0.04$ для расположения овальной лунки под углом 60° . В средней части лунки наблюдается выброс части жидкости, находящейся внутри лунки и совершающей колебательное движение. Этот выброс является следствием резонансных колебаний веретенообразного вихря, располагающегося внутри лунки, и вихревых структур, формирующих сдвиговый слой, образуемый при отрыве пограничного слоя с передней кромки углубления. Частота выбросов вихревых систем из средней (цилиндрической) части овального углубления, расположенного под углом 60° , близка к частоте выбросов торнадообразного вихря в кормовой части лунки. Частота выбросов в средней и кормовой частях углубления несколько увеличивается (до почти 0.15 Гц

или $St=0.06$) при уменьшении угла расположения овальной лунки. Для наименьшего из исследуемых углов ($\alpha = 30^\circ$) выбросы с этой частотой наблюдаются только над кормовой частью.

Формирование торнадообразного вихря и зарождение интенсивного поперечного течения в овальной лунке для указанных углов обтекания также были обнаружены при численном моделировании ламинарного обтекания подобных углублений. Примеры результатов расчетов, представленных в работе [17], показаны на рис. 16 для обтекания овальных лунок, которые по теплоотдаче превосходят сферические, умеренной глубины (0.14) и размаха ($L = d$). Их ориентация по отношению к внешнему потоку оказывает существенное влияние на интенсификацию теплообмена, прежде всего за счет перестройки симметричной структуры отрывного течения к асимметричной. При поперечном и продольном расположении лунки в ней образуется двухъячеистая симметричная вихревая структура, причем при $\alpha = 0^\circ$ отрывная область лишь частично заполняет лунку. В этом случае теплоотдача от области лунки максимальна и монотонно убывает по мере ее разворота к положению поперек потока. В то же время, влияние лунки на область следа по мере ее разворота возрастает.

Имеется максимум по суммарному теплосъему при углах поворота лунки более 60° , но менее 90° . Для этих углов поворота лунки в ней образуется моносмерчевая вихревая структура. Очевидно, что между наибольшей интенсификацией теплообмена и генерацией структур такого типа существует прямая связь. Как указано в работе [17], можно ожидать, что с ростом глубины лунок уров-

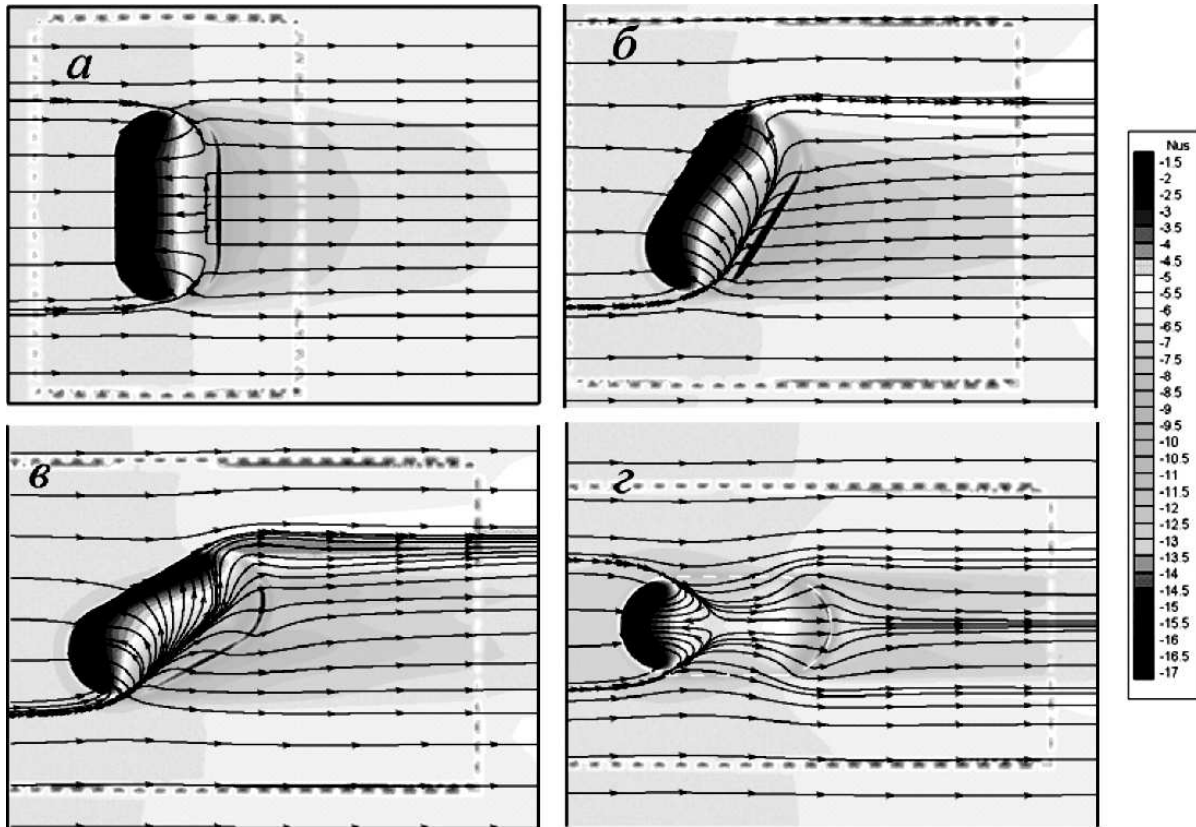


Рис. 16. Результаты расчета исследования влияния ориентации неглубокой овальной лунки ($L = d$) на картину растекания и поле относительной теплоотдачи. $a - \alpha = 90^\circ$; $б - 60^\circ$; $в - 30^\circ$; $г - 0^\circ$. $Re_d = 10^4$

ни интенсификации будут существенно выше. В соответствии с результатами, изображенными на рис. 16, наиболее интенсивная теплоотдача наблюдается позади овальной лунки, расположенной под углом 60° . Также как и число Нуссельта, касательные напряжения, оцененные по размыву контрастного покрытия (см. рис. 12), имеют максимум в ближнем следе срединной части лунки для этого угла обтекания. Таким образом, овальные лунки расширяют возможности теплового конструирования рельефов с максимальной теплоотдачей.

Следовательно, для ламинарного режима обтекания наибольшей теплогидравлической эффективностью обладают овальные лунки, имеющие длину цилиндрической части, равную диаметру сферической части, и располагающиеся под углом 60° относительно направления набегающего потока. Для такой асимметричной конфигурации луночного рельефа наибольшие касательные напряжения и максимальные значения числа Нуссельта наблюдаются в срединной и кормовой частях лунки. Такая гидродинамическая и теплофизическая особенность обтекания поверхности с локаль-

ными неоднородностями обусловлена формированием моновихревой веретенообразной структуры внутри овального углубления и ее выбросом позади лунки. Веретенообразная вихревая система, совершая трехмерные осциллирующие движения внутри лунки и взаимодействуя с вихревыми структурами сдвигового слоя, формирует поперечное спиралеобразное течение в углублении. Выброс торнадообразного вихря из кормовой части лунки и втекание жидкости внутрь лунки в передней сферической ее части обуславливают появление интенсивных поперечных градиентов скорости в пограничном слое. Возможность искусственного введения в пограничный слой продольных вихревых систем, являющихся выбрасываемыми частями торнадообразных вихрей, и формирование интенсивных устойчивых поперечных течений в нем позволяет управлять пограничным слоем. Это – одна из основных задач аэро- и гидродинамики. Установлено, что действие выбрасываемых вихревых систем в пограничный слой наблюдается на расстоянии до десяти диаметров углубления, после чего пограничный слой над обтекаемой пло-

ской поверхностью восстанавливается.

ВЫВОДЫ

Экспериментальные результаты исследования формирования вихревого течения внутри овальной лунки, расположенной на плоской поверхности, для ламинарного режима ее обтекания различными методами визуализации потока позволили сделать следующие выводы.

1. Расположение и геометрия асимметричной овальной лунки глубиной 0.22 диаметра имеет оптимальные параметры с точки зрения наибольшей теплогидравлической эффективности и формирования устойчивых вихревых структур в ее следе. Численное и физическое моделирование показали, что наиболее приемлемой для этой цели является овальная лунка, имеющая форму двух сферических сегментов, объединенных цилиндрической вставкой, и обладающая длиной цилиндрической части, равной диаметру ее сферических составляющих. Наиболее эффективным расположением такой лунки для ламинарного режима обтекания является угол 60° относительно направления набегающего потока.

2. Установлено, что при $\alpha = 60^\circ$ в придонной части овальной лунки формируется медленно вращающаяся крупномасштабная вихревая структура в виде веретенообразного вихря, ось которого изгибается и направлена вдоль продольной оси овального углубления. Источник этого вихря располагается на дне передней по потоку сферической части лунки, а сток, совершая колебательное движение, то присоединяется ко дну кормовой сферической части лунки, то выбрасывается из нее. Жидкость в веретенообразный вихрь поступает по спирали, двигаясь, в основном, от передней части лунки к ее кормовой части вдоль дна углубления. При выбросе веретенообразный вихрь принимает форму торнадообразного вихря, фокус которого находится на передней по потоку сферической стенке лунки, а сток периодически выбрасывается в пограничный слой позади кормовой сферической части лунки, формируя продольную когерентную вихревую структуру.

3. Обнаружено, что веретенообразная вихревая структура внутри овального углубления при увеличении и при уменьшении угла относительно $\alpha = 60^\circ$ вырождается. Так, для углов расположения лунки относительно направления потока 30° и 90° крупномасштабной когерентной вихревой структуры внутри овальной лунки не обнаружено. Для наименьшего из исследуемых углов

в овальном углублении жидкость совершает колебательное движение вдоль продольной оси лунки, а ее верхняя часть (на уровне плоскости пластины) совершает осцилляции в виде пакета бегущих волн, фронт которых направлен перпендикулярно направлению потока. При совпадении фаз колебания этих волн наблюдаются пучности и впадины на поверхности жидкости, заполняющей объем овального углубления. Когда интенсивные пучности приближаются к кормовой стенке углубления, то они выносятся частично потоком наружу из лунки в виде выбросов, а частично, ударившись в кормовую стенку, устремляются вдоль нее в придонную область овальной лунки. Для поперечного обтекания овальной лунки ($\alpha = 90^\circ$) наблюдается вяло протекающее колебательное движение жидкости несколько интенсивнее в прикорневой области. Выброс жидкости происходит хаотически и не интенсивно. Следовательно, при таком расположении лунки и режиме ее обтекания, практически, не происходит обмена энергией между течением внутри лунки и вне нее, то есть в овальной лунке реализуется автономное течение, имеющее несколько осциллирующий характер, что согласуется с результатами численного моделирования ламинарного обтекания поперечной канавки.

4. Установлено, что при увеличении угла расположения овальной лунки относительно направления потока выброс жидкости из лунки перемещается из одной только кормовой сферической части лунки в ее кормовую и срединную часть. При этом частота выбросов уменьшается от 0.15 до 0.1 Гц, которым отвечают числа Струхала 0.06 и 0.04, с изменением угла α от 30° до 60° . Наиболее интенсивно выброс вихревых структур при $\alpha = 60^\circ$ наблюдается в срединной цилиндрической части овальной лунки, что обуславливает появление в ближнем следе этой части лунки максимальных уровней касательных напряжений, которые в 1.5 раза выше, чем позади кормовой части лунки, и в 3 раза выше, чем позади ее передней по потоку части. Установлено, что действие выбрасываемых вихревых систем в пограничный слой наблюдается до десяти диаметров углубления, после чего пограничный слой над обтекаемой плоской поверхностью восстанавливается.

Авторы выражают искреннюю признательность и благодарят академика НАН Украины В.Т. Гринченко за активное участие в организации и обсуждении результатов исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту Совместного конкурса НАН Украины - РФФИ 2008-2009 г. (проект № 2-08а, Гос. рег. № 0108U003264; № 0109U003389 и проект № 08-08-90400).

1. Кикнадзе Г. И., Олейников В. Г. Самоорганизация смерчеобразных вихревых структур в потоке газов и жидкостей и интенсификация тепло- и массообмена. Препринт № 227.– Новосибирск: СО АН СССР, ИТФ, 1990.– 76 с.
2. Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V. Tornado-like technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses (Review of experimental results and intensification mechanisms).– Moscow: Basert Co.Ltd, 1994-1995.– 102 p.
3. Saric W. S. Gortler vortices // Annu. Rev. Fluid Mech.– 1994.– **26**.– P. 379-409.
4. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление.– М.: Изд-во Моск. энергет. ун-та, 2005.– 83 с.
5. Kiknadze G. I., Gachechiladze I. A., Oleinikov V. G., Alekseev V. V. Mechanisms of the self-organization of tornado-like jets flowing past three-dimensional concave reliefs // Heat Trans. Res.– 2006.– **37**, № 6.– P. 467-494.
6. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Городков А. Ю. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление // Третья международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". 21-23 октября 2008, г. Москва.– М.– 2008.– С. 1-3.
7. Афанасьев В. Н., Веселкин В. Ю., Леонтьев А. И., Скибин А. П., Чудновский Я. П. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности: Препринт МГТУ им. Н. Э. Баумана № 2-91. Ч. 1.– М.: Изд-во МГТУ, 1991.– 56 с.
8. Леонтьев И. А., Олишнев В. В., Дилевская Е. В., Исаев С. А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками // Изв. РАН. Энергетика.– 2002.– № 2.– С. 117-135.
9. Терехов В. И., Калинин С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сибир. физ.-техн. ж.– 1992.– Вып. 1.– С. 77-86.
10. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Терехов В. И. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008.– Минск, Беларусь.– 2008.– С. 1-10.
11. Нагора Г. П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин.– М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1996.– 100 с.
12. Wei X. J., Joshi Y. K., Ligrani P. M. Numerical simulation of laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface // J. Electronic Packaging.– 2007.– **127**, № 1.– P. 63-70.
13. Silva C., Marotta E., Fletcher L. Flow structure and enhanced heat transfer in channel flow with dimpled surfaces: application to heat sinks in microelectronic cooling // J. Electronic Packaging.– 2007.– **127**, № 3.– P. 157-166.
14. Исаев С. А., Леонарди Э., Тимченко В., Усачов А. Е. Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками // Третья международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". 21-23 октября 2008, г. Москва.– М.– 2008.– С. 1-10.
15. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А., Пышный И. А. Численный анализ влияния на турбулентный теплообмен глубины сферической лунки на плоской стенке // Инженерно-физический журнал.– 2003.– **76**, № 1.– С. 52-59.
16. Исаев С. А., Баранов П. А., Кудрявцев Н. А., Усачов А. Е. Анализ вихревого теплообмена при поперечном обтекании траншеи на плоскости с помощью многоблочных вычислительных технологий и различных полуэмпирических моделей турбулентности // Инженерно-физический журнал.– 2004.– **77**, № 4.– С. 53-63.
17. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб.– СПб: Судостроение, 2005.– 392 с.
18. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А. Идентификация самоорганизующихся смерчеобразных структур при численном моделировании турбулентного обтекания лунки на плоскости потоком несжимаемой жидкости // Письма в Журнал Технической Физики.– 2000.– **26**, № 1.– С. 28-35.
19. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А., Усачов А. Е. Бифуркация вихревого турбулентного течения и интенсификация теплообмена в лунке // Доклады РАН.– 2000.– **373**, № 5.– С. 615-617.
20. Алексеев В. В., Гачечиладзе И. А., Кикнадзе Г. И., Олейников В. Г. Смерчевой энергообмен на трехмерных вогнутых рельефах - структура самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен.– М.: МЭИ.– 1998.– С. 33-42.
21. Гринченко В. Т., Воропаев Г. А., Исаев С. А., Воскобойник В. А., Розумнюк Н. В., Воскобойник А. В. Особенности формирования вихрей в сферической лунке на пластине // Тези доповідей науково-практичної конференції "Комп'ютерна гідромеханіка".– Київ: ІГМ НАНУ.– 2008.– С. 16-17.
22. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Исаев С. А., Розумнюк Н. В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустичний вісник.– 2008.– **11**, № 3.– С. 34-58.
23. Isaev S. A., Leont'ev A. I., Baranov P. A. Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 2: Results of parametric studies // Thermal Engineering.– 2007.– **54**, № 8.– P. 655-663.
24. Исаев С. А., Леонтьев А. И. Проблемы моделирования вихревой интенсификации теплообмена на основе луночных технологий // Третья международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". 21-23 октября 2008, г. Москва.– М.– 2008.– С. 1-2.
25. Chyu M. K., Yu Y., Ding H., Downs J. P., Soechting F. O. Concavity enhancement heat transfer in an internal cooling passage // ASME Paper.– 1997.– 97-GT-437.– P. 1-8.
26. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Усачов А. Е., Фролов Д. П. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации теплообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании ее потоком несжимаемой вязкой жидкости с учетом влияния асимметрии

- формы, естественной конвекции и нестационарных процессов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен.– М.: МЭИ.– 1998.– С. 121–124.
27. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Усачов А. Е., Фролов Д. П. Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки // Изв. РАН: Энергетика.– 1999.– № 2.– С. 126–136.
28. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А., Метов Х. Т., Усачов А. Е. Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии // Инженерно-физический журнал.– 2001.– 74, № 2.– С. 62–67.
29. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Фролов Д. П., Харченко В. Б. Идентификация самоорганизующихся вихревых структур при численном моделировании ламинарного пространственного обтекания лунки на плоскости потоком вязкой несжимаемой жидкости // Письма в Журнал Технической Физики.– 1998.– 24, № 6.– С. 6–12.
30. Баранов П. А., Исаев С. А., Ключева О. Г., Усачов А. Е. Анализ вихревой интенсификации теплообмена в узком канале с однорядными овальными лунками // Третья международная конференция "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках". 21-23 октября 2008, г. Москва.–М: 2008.– С. 1–17.
31. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Митяков А. В., Пышный И. А., Усачов А. Е. Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке // Инженерно-физический журнал.– 2003.– 76, № 2.– С. 31–34.
32. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008.– Минск, Беларусь.– 2008.– С. 1–9.
33. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Кикнадзе Г. И., Кудрявцев Н. А., Гачечиладзе И. А. Сравнительный анализ вихревого теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки и двумерной траншеи на плоской стенке // Инженерно-физический журнал.– 2005.– 78, № 4.– С. 117–128.
34. Розумнюк Н. В. Мгновенные и осредненные характеристики вязкого потока около прямоугольной каверны // Прикладка гідромеханіка.– 2007.– 9, № 4.– С. 49–58.
35. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– Киев: ИТТФ НАНУ, 2005.– 76 с.
36. Коваленко Г. В., Халатов А. А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладна гідромеханіка.– 2008.– 10, № 1.– С. 23–32.
37. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Кінематика вихревого руху на обтічній поверхні з напівциліндричною канавкою // Акустичний вісник.– 2007.– 10, № 3.– С. 30–41.
38. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Источники резонансных мод осциллиющей внутри обтекаемой полусферической лунки // Акустичний вісник.– 2007.– 10, № 4.– С. 36–46.
39. Исаев С. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на стенке узкого канала // Известия РАН. Теплофизика высоких температур.– 2003.– 41, № 5.– С. 755–770.