

ГЕНЕРАЦІЯ ПСЕВДОЗВУКОВИХ ПУЛЬСАЦІЙ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ОБТЕКАННІ ОВАЛЬНОЇ ЛУНКИ

Г. А. ВОРОПАЄВ, В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

The results of experimental and numerical researches of forming of vortical flow are presented into an oval dimple, located on a flat surface, for the laminar flow regime. 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

Применение луночных рельефов на обтекаемой поверхности приводит к существенному выигрышу в энергосберегающих технологиях и устройствах, где интенсифицируют теплоперенос, уменьшают гидродинамическое сопротивление, повышают качество аэродинамических профилей и снижают гидродинамические шумы. Сферические выемки не являются наилучшими при турбулентном режиме течения, например, теплоносителя, а в ламинарных потоках их использование практически не оправдано [1]. Внутри таких лунок в зависимости от ряда параметров, в том числе геометрических и гидродинамических, формируются симметричные и асимметричные вихревые системы, которые совершают бифуркации и неустойчивые переключательные движения. В этих условиях в отверстиях сферических лунок, особенно глубоких, генерируются симметричные аркообразные или подковообразные вихри и торнадообразные моновихревые структуры, располагающиеся под углом порядка 45° относительно направления потока. Источник торнадообразного или смерчеобразного вихря находится на стенке лунки вблизи ее дна, а сток выбрасывается наружу из лунки [1-3].

Придание лунке такой формы, чтобы организовать устойчивые вихревые системы с регулируемой интенсивностью и циркуляцией, которые позволят улучшить технико-экономические показатели обтекаемых поверхностей, является одной из основных задач управления пограничным слоем. К таким лункам можно отнести овальные лунки, которые располагают под определенным расчетным углом к направлению набегающего потока. В овальных лунках поперечная завихренность, генерируемая в результате взаимодействия сил вязкости и инерции, а также циркуляционного и вторичного течения внутри отверстия лунки, трансформируется, например, в продольную завихренность, которая, выбрасываясь из лунки и перемещаясь в пристеночном слое, может существенно влиять на пограничный слой и его структуру. Как показали исследования [1, 3, 4],



Рис. 1

относительный теплоотвод сферических лунок заметно ниже, чем от асимметричных овальных лунок. Способность овальных лунок создавать вихревые структуры с интенсивным вторичным течением предопределяет их преимущество и обеспечивает работоспособность при ламинарном режиме течения. Например, для асимметричной лунки, сочетающей неглубокую сферическую лунку с цилиндрической вставкой, имеет место значительное (порядка 10% [1, 4]) увеличение теплоотдачи от стенки. Необходимо отметить, что при этом наблюдается высокая устойчивость автоколебательной торнадообразной структуры, обеспечивающая стабильность эффекта вихревой интенсификации теплообмена и управления пограничным слоем.

Создание вихрегенераторов, которые бы имели минимальное гидродинамическое сопротивление и генерировали бы искусственные вихревые системы с заданными кинематическими и динамическими параметрами, возможно, как показывают последние научные исследования, при использовании асимметричных овальных углублений умеренной глубины (порядка 0.2 диаметра лунки или ее ширины). В связи с этим, цель настоящих экспериментальных исследований – изучить гидродинамические особенности формирования и эволюции вихревых структур в овальных углублениях и определить их степень воздействия на псевдозвуковые пульсации скорости и давления ламинарного пограничного слоя.

1. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом канале длиной 16 м, шириной 1 м и глубиной 0.8 м со свободной поверхностью воды глубиной 0.4 м. Скорость потока изменялась от 0.03 м/с до 0.1 м/с. На высоте порядка 0.1 м от дна канала устанавливалась гидравлически гладкая пластина, оборудованная концевыми шайбами. Пластина, изготовленная из полированного органического стекла толщиной 0.01 м, шириной 0.5 м и длиной 2 м, была заострена с двух сторон для обеспечения безотрывного ее обтекания. На расстоянии 1 м от носка пластины (рис. 1а) было сделано одиночное углубление овальной формы в виде сферического сегмента диаметром 0.04 м, разделенного цилиндрической вставкой длиной 0.04 м. В результате углубление приняло овальную форму диаметром 0.04 м, длиной 0.08 м и глубиной 0.09 м, которое имеет относительную глубину 0.22d. Поворотное устройство на плоской пластине, в котором располагалось овальное углубление, давало возможность поворачивать последнее вокруг своего центра на угол от 0° до 360° с шагом 15°.

Заподлицо с обтекаемой поверхностью овальной лунки и на пластине вблизи углубления устанавливались 13 миниатюрных датчиков пульсаций пристеночного

давления (рис. 1б). Пьезокерамические датчики мембранного типа имели диаметр чувствительной поверхности $1.6 \cdot 10^{-3}$ м. Наряду с датчиками пульсаций пристеночного давления в экспериментах использовали пленочные термоанемометры фирмы Диза. Термоанемометры через соответствующие державки и координатные приспособления вводились внутрь пограничного слоя и в вихревой поток углубления для измерения поля скоростей. Электрические сигналы датчиков пульсаций пристеночного давления и пленочных термоанемометров фильтровались, усиливались, регистрировались и измерялись соответствующей аппаратурой. Измеренные сигналы подавались на многоканальные аналогово-цифровые преобразователи, встроенные в персональный компьютер, где регистрировались, а затем обрабатывались по стандартным и специально разработанным программам и методикам.

Перед проведением инструментальных измерений проводилась визуализация потока. Визуализация осуществлялась посредством введения в поток красящих веществ и смываемых контрастных покрытий, которые позволяли оценить поле течения и касательные напряжения на обтекаемой поверхности. Материалы визуализации регистрировались цифровыми видеокамерами и фотоаппаратами, а затем обрабатывались и анализировались по соответствующим программам на персональных компьютерах и графических станциях. Обработка и анализ траекторий движения меченых частиц позволила определить направление движения и скорость их переноса.

Погрешность измерения скорости движения меченых частиц и подкрашенной жидкости составляет менее 12% при доверительном интервале 0.95. Погрешность измерений осредненных и интегральных величин не превышала 10%. Погрешность измерений спектральных и корреляционных зависимостей полей пульсаций скорости и давления составляла не более 2 дБ в диапазоне частот от 0 Гц до 12.5 кГц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения осредненной и пульсационной составляющих 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). Проведенные экспериментальные исследования позволили определить ряд характерных особенностей формирования течения внутри овальных углублений и в их области следа для ламинарного режима обтекания [5, 6]. С увеличением угла расположения овальной лунки внутри лунки формируется моновихревая крупномасштабная структура в виде веретенообразного вихря. Максимальное развитие эта структура принимает при угле 60° , а потом с ростом угла она вырождается и, при поперечном обтекании лунки, веретенообразной вихревой структуры внутри овальной лунки не было зарегистрировано.

При размыве контрастное вещество 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 стенке. Верхняя часть подкрашенного слоя, находящегося внутри углубления, совершает колебательные движения поперек углубления (параллельно его продольной оси), а 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 части. При взаимодействии колебательных движений жидкости внутри углубления в его верхней части формируются пучности в переднем по потоку краю углубления, в его середине и в дальнем краю углубления.

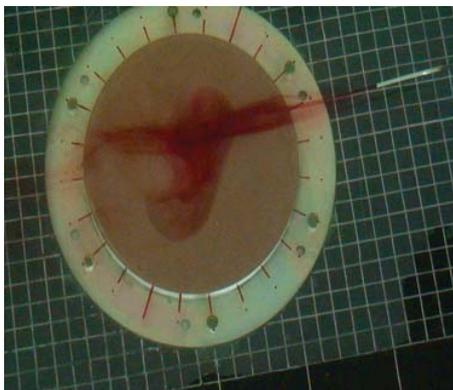


Рис. 2

Формирование поперечного колебания, волновой фронт которого движется параллельно продольной оси углубления, обусловлено развитием возмущений в слое смешения. В то же время формирование продольных колебаний, распространяющихся вдоль углубления от его передней части к кормовой, существенно зависит от угла установки углубления относительно набегающего потока, концевых эффектов боковых стенок углубления. Взаимодействие этих двух колебательных процессов внутри углубления генерирует автоколебательное движение жидкости в углублении с почти синхронным формированием пучностей в передней, средней и дальней по потоку частях углубления. Они наиболее ярко проявляются при угле установки углубления равном 60° . Частота продольного колебательного движения почти в три раза меньше, чем частота поперечных колебаний или частота формирования вихревых структур в сдвиговом слое.

Медленно вращающаяся крупномасштабная вихревая структура в виде веретенообразного вихря, ось которого изгибается и направлена вдоль продольной оси овального углубления, формируется в придонной части углубления, что проиллюстрировано на рис. 2. 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. Меченые частицы, поступающие в веретенообразный вихрь, движутся по спирали от передней части лунки к ее кормовой части вдоль дна углубления.

При достаточной интенсивности автоколебательного движения в срединной части углубления, наличие пучностей вдоль оси углубления приводит к образованию выбросов жидкости из углубления в виде петелек или шпилькообразных вихрей. Установлено, что выбросы крупномасштабных вихревых структур происходят из средней части углубления (0.09 Гц и $St=0.04$) и дальней по потоку его части ($0.08\dots 0.1$) Гц и $St=(0.03\dots 0.04)$. В ближней части углубления выбросов, практически, не наблюдалось, по всей видимости, из-за незначительной интенсивности колебательного движения в этой области углубления, что соответствует развитию волн возмущений в плоском случае (неустойчивость Гельмгольца).

Среднеквадратичные значения пульсаций пристеночного давления внутри овального углубления и вблизи него пропорциональны квадрату скорости набегающего потока. При этом максимальные уровни пульсаций давления наблюдаются в месте ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки и в ее ближнем следе. Наименее интенсивные пульсации пристеночного давления имеют место в придонной области овального углубления, которые почти на порядок ниже, чем на кормовой стенке лунки. Внутри лунки пульсации давления существенно ниже, чем в ненарушенном пограничном слое, особенно при малых скоростях ее обтекания. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя уровни пульсаций давления растут и в $(3\dots 4)$ раза превышают пульсации давления над гладкой пластиной. Наибольшие значения они имеют в средней (цилиндрической) части кормовой стенки овального углубления. В области ближнего следа лунки интенсивность пульсаций псевдозвукового давления еще более нарастает и приобретает максимальных значений позади передней сферической и

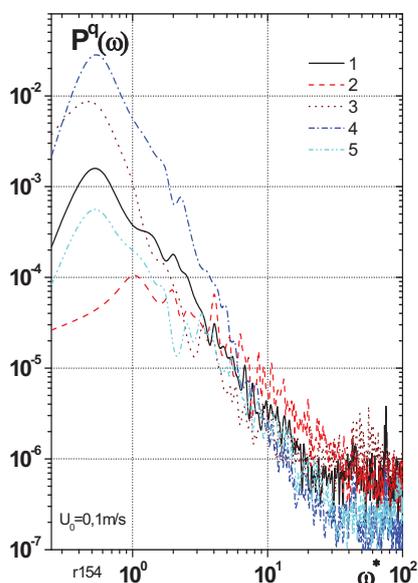


Рис. 3

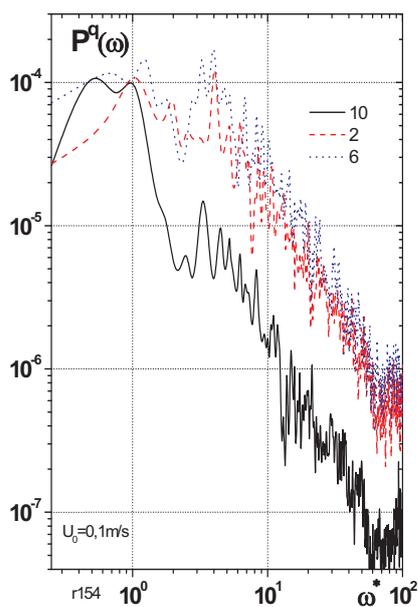


Рис. 4

цилиндрической части лунки. При удалении от овальной лунки пульсации давления убывают и приближаются к уровням ненарушенного пограничного слоя.

На рис. 3 представлены спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль срединного сечения овальной лунки, расположенной под углом 60° относительно направлению потока, для скорости потока 0.1 м/с . Нормировка данных проводилась по скоростному напору ($q = \rho U^2/2$) и по внешним переменным, по диаметру овальной лунки и по скорости потока ($p^q(\omega) = p^2(\omega)U/q^2d$). Частота приводилась к безразмерному виду, как $\omega^* = 2\pi fd/U$. Номера кривых отвечают номерам датчиков пульсаций давления в соответствии с рис. 1б. Вдоль срединного сечения лунки максимальные уровни пульсаций давления зарегистрированы в ближнем следе лунки, в непосредственной близости кормового края, что показано на рис. 3 (см. кривую 4). Наибольшая интенсивность пульсаций давления позади лунки наблюдается только в области низких частот. В области ударного взаимодействия сдвигового слоя с кормовой стенкой лунки также наблюдаются довольно высокие уровни пульсаций пристеночного давления в области низких частот, которые почти на порядок выше, чем на обтекаемой поверхности пластины под ненарушенным пограничным слоем (кривая 3 и 1). Минимальные уровни пульсаций давления наблюдаются на дне овального углубления, которые почти на три порядка ниже в области низких частот, чем в ближнем следе лунки и на два порядка ниже, чем на плоской пластине перед овальным углублением. В области высоких частот пульсации давления на дне лунки являются наиболее интенсивными. По мере удаления от обтекаемой поверхности лунки характер поведения спектральных кривых приближается к

тому, который наблюдался в ненарушенном пограничном слое.

Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления, измеренные вдоль дна овального углубления, обтекаемого потоком со скоростью 0.1 м/с , показаны на рис. 4. Интенсивность пульсаций давления на дне в передней по потоку сферической части овального углубления, где, как показали визуальные исследования, наблюдается затекание жидкости внутрь лунки, является наименьшей во всем частотном диапазоне, кроме области низких частот. На дне кормовой сферической части овальной лунки интенсивность пульсаций давления наибольшая. Это, по всей видимости, обусловлено тем, что в эту часть лунки устремляется поток вдоль ее дна и отсюда происходит интенсивный выброс жидкости наружу из лунки в пограничный слой. Как

показали визуальные исследования, выброс вихревых структур также наблюдается и в центральной или срединной части овального углубления, обтекаемого ламинарным потоком. Поэтому и в этой придонной области лунки наблюдаются интенсивные перемещения жидкости, которые генерируют значительные псевдозвуковые пульсации поля скоростей и давлений, что проиллюстрировано на рис. 4 кривой 2.

ВЫВОДЫ

Наибольшей теплогидравлической эффективностью обладают овальные лунки, имеющие длину цилиндрической части равную диаметру сферической части и располагающиеся под углом 60° относительно направления набегающего потока. Наибольшие касательные напряжения и максимальные значения числа Нуссельта наблюдаются в срединной и кормовой частях лунки. Внутри овальной лунки формируется веретенообразная вихревая система, генерирующая псевдозвуковые пульсации давления, которая при выбросе принимает форму торнадообразного вихря. Веретенообразная вихревая структура внутри овального углубления при увеличении и при уменьшении угла относительно $\alpha=60^\circ$ вырождается. 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. Установлено, что действие выбрасываемых вихревых систем в пограничный слой наблюдается до десяти диаметров углубления, после чего пограничный слой над обтекаемой плоской поверхностью восстанавливается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб – СПб: Судостроение, 2005. - 392с.
2. Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление. – Москва: Изд-во Моск. энергет. ун-та, 2005. – 83 с.
3. 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.
4. 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. – 2008. – С. 1-10.
5. Гринченко В.Т., Воропаев Г.А., Исаев С.А., Воскобойник В.А., Воскобойник А.А., Воскобойник А.В. Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2009. – Вип. 1. С. 191 – 198.
6. Воропаев Г.А., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В., Исаев С.А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11, № 4. – С. 31–46.