

УДК 533.6.08

ВИХРЕВОЕ ДВИЖЕНИЕ В ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАНАВКЕ НА ПЛАСТИНЕ

Отримані поля швидкості дали змогу зафіксувати у канавці великомасштабний вихор та серію характерних дрібномасштабних вихорів. Встановлено, що при збільшенні швидкості обтікання число дрібномасштабних вихрових структур збільшується, а розмір великомасштабного вихору зменшується та він притискається потоком ближче до придонної частини канавки/

The velocity fields are got enabled to fix a large-scale vortex and series of characteristic small-scale vortices in the slot. It is set that at the increase of flow velocity the number of small-scale vortical structures is increased, and the size of large-scale vortex decreases and he pressing the flow near-bottom part of the slot

Введение

Обтекаемые поверхности многих конструкций имеют углубление разнообразной конфигурации и формы. Среди них можно выделить гидротехнические сооружения с технологическими нишами, на которые действует течение и волновое движение в открытом море и вблизи берегов, углубления конструктивного или случайного характера, расположенные на корпусах подводных и надводных судов, колодцы шасси и грузовые люки на самолетах, корпуса устройств коррекции траектории движения на космических аппаратах и в других конструкциях [1]. В зависимости от режимов обтекания и геометрических параметров таких неоднородностей, внутри них формируются сложные вихревые течения, которые могут привести к увеличению сопротивления тел, шума и вибраций [2, 3]. Повышенный интерес к использованию, например, сферических углублений небольшой глубины связан также с тем, что спортивные снаряды плохобтекаемой формы, которые имеют на своей поверхности элементы шероховатости в виде углублений, пролетают большее расстояние. На хорошо обтекаемых поверхностях аппаратов в энергосберегающих технологиях используются системы углублений с целью генерации вихревых структур, что существенно увеличивает теплоассоперенос и процессы перемешивания, а также уменьшает низкочастотный гидродинамический шум и вибрации. В теплоэнергетике широко используются поверхности с системами углублений, что на практике позволило улучшить их теплогидравлическую эффективность [3–5].

Результаты экспериментальных и численных исследований показывают, что вихревое движение в локальном

углублении, расположенном на обтекаемой поверхности, является крайне сложным [3–7]. В зависимости от геометрических параметров углубления и режимов его обтекания внутри углубления формируется циркуляционное течение, генерируются крупномасштабные когерентные вихревые структуры и мелкомасштабные вихри, которые взаимодействуют как друг с другом, так и с обтекаемой поверхностью. При достаточно высоких скоростях потока с передней кромки углубления отрывается пограничный слой, формируя сдвиговый слой, часть которого в результате действия сил вязкости и инерции сворачивается в вихревые структуры и, взаимодействуя с внутренним вихревым движением в углублении, интенсифицирует турбулентность потока над ним. Ударное взаимодействие вихревых структур сдвигового слоя с кормовой стенкой углубления порождает мощные пульсации скорости и давления, инициирует осцилляции потока как внутри лунки, так и в ее окрестности, порождая резонансные колебания внутри отверстия углубления. Выброс вихревых систем наружу из обтекаемого углубления и их взаимодействие с набегающим потоком образует интенсивные поля пульсаций векторных и скалярных переменных течения, передающиеся в окружающее пространство, в том числе и на обтекаемую поверхность.

Постановка задачи исследований

Несмотря на интенсивное развитие численных методов, ключевую роль в исследовании сложных турбулентных вихревых течений играет эксперимент. Чаще всего новые теоретические положения и гипотезы строятся именно на основе полученной в экспериментах инфор-

В.Н. Турик, канд. техн. наук
НТУУ «Киевский политехнический институт»,
В.В. Бабенко, д-р техн. наук,
В.А. Воскобойник, канд. техн. наук,
А.В. Воскобойник, канд. техн. наук
Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев

мації. В зв'язі з цим в представленій роботі ставиться задача експериментальних досліджень особливостей структури поля швидкості всередині локального напівциліндричного углиблення, поперечно обтекаемого потоком при різних режимах обтекания.

Експериментальна установка

Для проведення експериментальних досліджень була створена дозвукова аеродинамічна труба незамкнутого типу [8, 9], в якій досліджувалося вихреве течення в одиночному поперечно обтекаемом напівциліндричному углибленні діаметром $d = 0,0185$ м, глибиною $0,0115$ м і довжиною $0,081$ м. Аеродинамічна труба мала внутрішній діаметр $0,102$ м і працювала на всасування повітря з лабораторного приміщення (рис. 1). Перед вимірним участком, де монтувалася пластина з углибленням, розміщався входний участок довжиною $0,4$ м і діаметром $0,102$ м. Входний участок починався з воздухозаборника довжиною *около* $0,1$ м, спрофілюваного по закону лемніскати, забезпечуючої безотрывний вхід повітряного потоку в аеродинамічну трубу з достатньо рівномірним профілем швидкості і тиску. При монтажі аеродинамічного стенда всі узли і системи встановлювалися на вібродемпфуючих і віброізолюючих кріпленнях і прокладках, в тому числі типу «сэндвич». При цьому використовувалися як активні (динамічні), так і пасивні методи зменшення акустичних і вібраційних шумів. В результаті вдалося досягти прийнятних умов проведення експериментальних досліджень з достатньо високою ступенню точності і повторюваності результатів.

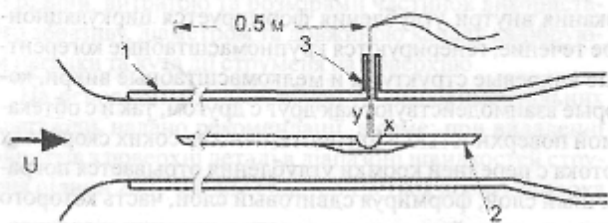


Рис. 1. Схема робочого участка аеродинамічної установки і системи координат:
1 — робочий участок; 2 — пластина з напівциліндричною канавкою; 3 — державка з проволочним датчиком термоанемометра.

Гідравлічно гладка пластина товщиною $0,004$ м мала довжину $0,635$ м і ширину $0,102$ м, передній і задній її кінці були заострені, щоб уникнути зон отрыву пограничного шару. Пластина монтувалася в осевому перерізі прозорого вимірного участка аеродинамічної труби вздовж її довільної осі (рис. 1). Довільна ось поперечно обтекаемого напівциліндричного углиблення розміщався на відстані $0,514$ м від переднього краю пластины. Розвиток пограничного шару вздовж досліджуваної пластины було природним, без використання турбулізаторів в носовій частині пластины. Виміри проводилися при числах Рейнольдса $Re_x = U_\infty x / \nu = (0,37-6,7) \cdot 10^5$ і товщині пограничного шару перед углибленням $\delta/d = (0,162-0,703)$.

Це дало можливість досліджувати ламінарний і турбулентний режими обтекания пластины з локальним углибленням. Інтенсивність турбулентності для найбільш швидкої потоку не перевищала (3-4) % в місці розташування углиблення на пластині.

Поле швидкості над обтекаемой поверхністю і всередині углиблення вимірялось з допомогою однопровідного проволочного датчика, підключаемого до мостової електричної схеми термоанемометра постійної температури фірми DISA. На верхній поверхні прозорого вимірного участка аеродинамічної труби в спеціально створеному отворі встановлювалося координатне пристрій, в якому через відповідні державки і узли кріплень фіксувалися проволочні термоанемометричні датчики (рис. 1). Електричні сигнали з проволочних датчиків надходили на контрольну-вимірну апаратуру (вольтметри, осцилографи, частотомери), а також апаратуру реєстрації даних (чотирьохканальний вимірний магнітофон). Зареєстровані сигнали оброблялися на спеціалізованих комплексах спектрального і кореляційного аналізу, а також через аналогово-цифрові перетворювачі подавалися на персональні комп'ютери, де дані оброблялися і аналізувалися по розробленим програмам і методикам. Калібровка і тарировка термоанемометричних датчиків проводилася перед, в час і після закінчення вимірів як абсолютним, так і відносним методами. Калібрівочні залежності зареєстрованих параметрів використовувалися при обробці і аналізі експериментальних результатів. Погрешність вимірів осереднених характеристик поля швидкості не перевищала 10 % з надійністю $0,95$ або 2σ .

Дослідження починалися з проведення візуалізації потоку як в углибленні, так і в його околицях [8]. Картини візуалізації і динаміка вихревого руху всередині углиблення і поблизу нього реєструвалися швидкісними кінокамерами, цифровими фотоапаратами і відеокамерами з наступною обробкою і аналізом фото- і відеоматеріалу на персональних комп'ютерах, оснащених спеціально розробленим програмним забезпеченням. Далі в характерних областях, де вихреве рух середовища прослідковується чітко, проводилися інструментальні виміри з визначенням кількісних параметрів вихревого руху.

Результати вимірів

В час експериментальних досліджень полів осереднених і пульсаційних швидкостей як в довільному, так і поперечному напрямках були отримані векторні поля середніх швидкостей. В результаті побудовані ізотехи, або лінії рівних швидкостей, визначають кінематичні характеристики поля течення над досліджуваною пластині з углибленням для різних швидкостей обтекания. На ізолініях, представлених на рис. 2-4, цифрами позначена середня швидкість відносно швидкості набегаючого потоку в процентах, а вносні цифри вказують на характерні зони в углибленні, які трактуються як місця існування квазіустойчивих вихре-

вых систем. Кроме того, на этих рисунках указаны значения скоростей обтекания и чисел Рейнольдса, определенных по внешним переменным (U_∞ и ν) для местоположения углубления по длине пластины и по диаметру углубления, а именно как Re_x и Re_d .



Рис. 2. Линии равных средних скоростей на пластине с поперечно расположенным полуцилиндрическим углублением при скорости набегающего потока 1,11 м/с.

Изоахи для наименьшей из исследуемых скоростей обтекания $U_\infty = 1,11 \text{ м/с}$ показаны на рис. 2 для $Re_x = 3,7 \cdot 10^4$ и $Re_d = 1360$. Над обтекаемой пластиной и углублением отчетливо видны области торможения и ускорения набегающего потока, которые охватывают не только пограничный слой над пластиной и сдвиговый слой смешения, а также циркуляционную область в самом углублении. Перед тем, как пограничный слой оторвется от переднего края углубления, он несколько затормаживается. Торможение хорошо видно по подъему, например, изолинии скорости, равной $0,2U_\infty$ перед точкой отрыва. При отрыве пограничного слоя образующийся слой смешения расширяется в поперечном направлении при продвижении вниз по потоку. Нижняя граница слоя смешения, также как и верхняя ее часть, имеют волнообразную форму, которая почти за три периода перекрывает ширину канавки. Длина волны нижней границы слоя смешения в передней части углубления в два раза меньше, чем в кормовой, что коррелирует с данными для профилей продольной средней и пульсационной скорости, представленных в работах [4, 9]. В области взаимодействия слоя смешения с кормовой стенкой углубления образуются два направления движения потока. Первая часть устремляется вверх к краю углубления, а вторая вдоль стенки переносится ко дну углубления. Первая часть, встречаясь с вышерасположенным относительно слоя смешения ($y = 0$) потоком, приводит к торможению и некоторому подъему последнего, что видно на рис. 2 (сечение с координатой $x \approx 0,4d$). Вторая часть слоя смешения (нижняя), устремившаяся ко дну углубления, поднимается вверх вдоль передней стенки углубления, доходя до зоны отрыва пограничного слоя и, встретившись с оторвавшимся пограничным слоем, объединяется с вновь формируемым слоем смешения и направляется к кормовой стенке углубления. Эта часть слоя смешения образует циркуляционную зону, внутри которой формируется первичный вихрь, обозначенный на рис. 2 цифрой 1. В ядре этого вихря средние скорости не превышают значения $0,005U_\infty$. Первичный вихрь зани-

мает почти половину объема углубления и располагается несколько наклонно по отношению к продольной оси пластины или направления скорости обтекания.

На кормовой стенке углубления формируется характерная зона, обозначенная цифрой 2. Вблизи этой зоны имеет место седловая точка, или точка, где появляется раздвоение изолинии, например, кривая $0,06U_\infty$ (см. рис. 2). С приближением к зоне 2 средняя скорость падает, указывая на местоположение мелкомасштабной вихревой структуры, наиболее вероятно — пары противоположно вращающихся вихрей. Цифрой 3 отмечена очередная замкнутая область низкоскоростного течения в углублении, характеризующая зону зарождения вторичного вихря.

Таким образом, при малой скорости обтекания $U_\infty = 1,11 \text{ м/с}$ в полуцилиндрическом углублении обнаружены три относительно устойчивые области низкоскоростного циркуляционного течения, которые сформированы, главным образом, в придонной и кормовой частях углубления. Зарегистрировано высокоскоростное циркуляционное течение, направленное от кормовой стенки углубления и вдоль придонной поверхности до точки отрыва пограничного слоя. Замыкается это циркуляционное течение объединением с вновь формируемой нижней границей слоя смешения, который, совершая волнообразное движение, взаимодействует, в свою очередь, с кормовой стенкой углубления.

При увеличении скорости обтекания пластины с поперечно расположенной полуцилиндрической канавкой характерные черты структуры течения в целом остались схожими с результатами для $U_\infty = 1,11 \text{ м/с}$, но появились и некоторые отличия. Так, скорость потока, достигающего верхнего края кормовой стенки, возросла с $0,2U_\infty$ до $0,6U_\infty$ (рис. 2 и 3), кинетическая энергия взаимодействия набегающего потока с кормовым краем углубления значительно увеличилась, поскольку она пропорциональна квадрату скорости. Циркуляционную область также начинает формировать возвратный поток с более высокой скоростью. При низкоскоростном обтекании углубления в его кормовой части наибольшие скорости составляли порядка 6 % от U_∞ (рис. 2), а при $U_\infty = 10,1 \text{ м/с}$ местные средние скорости в этой же кормовой части превышали 30 % от U_∞ и, естественно, энергообмен между набегающим потоком и циркуляционным течением в углублении в последнем случае, несомненно, возрос. С приближением ко дну углубления относительная скорость циркуляционного течения значительно уменьшилась и, не достигнув еще самой нижней точки полуцилиндрического углубления, этот циркуляционный поток начал удаляться от обтекаемой поверхности дна и устремился к нижней границе слоя смешения. Необходимо отметить, что при $U_\infty = 1,11 \text{ м/с}$ циркуляционное течение достигало зоны отрыва пограничного слоя с переднего края углубления (рис. 2), а при $U_\infty = 10,1 \text{ м/с}$ циркуляционное течение объединилось со слоем смешения значительно ниже по направлению потока (в сечении $x \approx -0,3d$). Вблизи этого местоположения по координате x в пограничном слое наблюдается притормаживание потока, а затем его ускорение (рис. 3), коррелируя с данными работы [9]. Ядро низкоскоростной

область имеет форму подковы или буквы V (рис. 3), образуя первичный вихрь в углублении, обозначенный цифрой 1. Этот V-образный квазистойчивый крупномасштабный вихрь, ограничивающий циркуляционную зону, занимает почти треть объема углубления, располагается чуть ниже его центральной области и имеет форму вихря, который как бы прогнут почти посредине набегающим потоком.

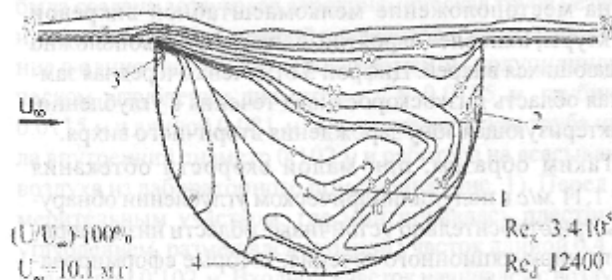


Рис. 3. Линии равных средних скоростей на пластине с поперечно расположенным полуцилиндрическим углублением при скорости набегающего потока 10,1 м/с.

В кормовой части углубления (см. рис. 3) несколько выше, чем на рис. 2, формируется так называемый кормовой вихрь, а возможно, как ранее отмечено, и пара противоположно вращающихся вихрей, которые обозначены цифрой 2. Эта вихревая область является более скоростной, чем на рис. 2. При увеличении скорости обтекания наибольшие изменения структура течения в углублении получила в передней отрывной части канавки. В отличие от рис. 2, на рис. 3 за точкой отрыва пограничного слоя отчетливо просматриваются область заторможенного течения с явно выраженной характерной циркуляционной зоной пониженных средних скоростей. Сразу за точкой отрыва прослеживается квазистойчивый мелкомасштабный вихрь (цифра 3, рис. 3). В нижней части углубления, в его придонной области, формируется еще одна циркуляционная, или вихревая, область пониженных средних скоростей, образующих ее ядро. Эта область, обозначенная цифрой 4, сосредоточена вблизи местоположения, где высокоскоростное циркуляционное течение отрывается от придонной поверхности углубления и устремляется на объединение со слоем смешения, о чем ранее уже говорилось.

При дальнейшем увеличении скорости обтекания до 20,1 м/с характер структуры потока как в углублении, так и над пластиной не претерпел кардинальных изменений, но стал более сложным. Это проиллюстрировано на рис. 4, но некоторые отличия от картин рис. 3, а тем более рис. 2, имеют место. Во-первых, в кормовой части углубления зарегистрирована характерная вихревая область, обозначенная цифрой 2, расположенная еще выше, чем на рис. 3 и на рис. 2. Во-вторых, высокоскоростное циркуляционное течение оторвалось от дна углубления несколько ниже по потоку, почти непосредственно у нижней точки углубления. Это циркуляционное течение устремилось к слою смешения по более крутой траектории в отличие от дан-

ных рис. 3. В-третьих, крупномасштабный циркуляционный вихрь стал более компактным и принял эллипсообразную форму с наклоном, близким к наклону кормовой части V-образного вихря на рис. 3. В-четвертых, в отрывной области углубления появились уже две мелкомасштабные вихревые системы (цифры 3 и 4, рис. 4), и они стали более энергоемкими, то есть, окружная скорость их повысилась. Также следует отметить, что при $U_\infty = 20,1$ м/с повысилась и относительная скорость циркуляционного течения, отделяющего первичный циркуляционный вихрь (обозначенный цифрой 1) от заторможенной отрывной области углубления. В-пятых, область слияния циркуляционного течения с нижней границей слоя смешения переместилась ближе к центру углубления. Здесь в оторвавшемся пограничном слое появился высокий положительный градиент средней скорости от заторможенного к ускоренному течению. Пограничный слой реагирует на эти зоны взаимодействия циркуляционного течения и слоя смешения несколько выше по потоку, создавая зоны торможения и ускорения течения (рис. 3 и 4).

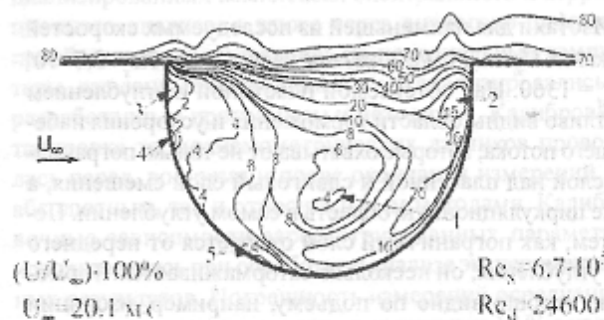


Рис. 4. Линии равных средних скоростей на пластине с поперечно расположенным полуцилиндрическим углублением при скорости набегающего потока 20,1 м/с.

Выводы

1. Установлено, что с увеличением скорости обтекания внутри канавки формируется сложное вихревое течение, которое приводит к изменению структуры пограничного слоя над пластиной. Над обтекаемой поверхностью образуются зоны торможения и ускорения течения, что особенно явно проявляется в пристеночной области пограничного слоя.

2. Обнаружено, что внутри полуцилиндрической канавки возникает циркуляционное течение, генерируемое взаимодействием сдвигового слоя, образованного при отрыве пограничного слоя с переднего края канавки, с кормовой стенкой канавки. Циркуляционное течение порождает квазистойчивую крупномасштабную вихревую структуру. В пристеночной области взаимодействие сдвигового слоя и крупномасштабного вихря с обтекаемой поверхностью генерирует мелкомасштабные вихри.

3. Зафиксировано, что с увеличением скорости набегающего потока число, масштаб и местоположение квазистойчивых вихревых структур изменяются. Так, их число увеличивается, а размер крупномасштабного когерент-

