

Перспективи подальших досліджень. На сьогодні відсутня універсальна модель опису турбулентних течій. Необхідно проводити пошук шляхів створення більш досконалих моделей турбулентності. Для цього потрібні проведення більш точних експериментальних та числових досліджень.

Висновки. В роботі приведена постановка та розв'язок задачі розрахунку обтікання літального апарату на основі розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є – Стокса та шляхом використання методу дискретних вихорів. Отримано розподілені та інтегральні аеродинамічні характеристики. Методи дискретних вихорів дозволяють отримати придатні результати з набагато меншими затратами часу на розробку програмного забезпечення та проведення відповідних розрахунків. Слід відмітити, що використання складних методів приводить до значних часових затрат. В такому випадку вибір варіантів компоновочних схем транспортного апарату дещо ускладнюється. В зв'язки з цим рекомендується проводити дослідження з використанням методів різної форми складності.

Список літератури

1. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М. : Физматлит, 2008. – 368с.
2. Гиневский А. С., Желанников А. И. Вихревые следы самолетов. – М. : Физматлит, 2008. – 172с.
3. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компоновувальних перспективних швидкісних транспортних апаратів : дис. доктора технічних наук : 05.07.01. – Дніпропетровськ, 2010. – 364с.
4. Сохацький А. В. Застосування сингулярних інтегральних рівнянь для чисельного моделювання аеродинаміки несучих систем транспортних засобів // Вісник Академії митної служби України. – Дніпропетровськ : АМСУ, 2006. – № 3 (27). – С. 81 – 88.
5. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // AIAA paper. – 1992. – Vol. 0439. – 21 p.
6. Van Leer B. Flux–vector splitting for the Euler equations // Lecture Notes in Phys. – 1982. – V. 170. – P. 507 – 512.
7. Gerz T., Holzapfel F., Darracq D. Aircraft wake vortices // WakeNet Position Paper. – 2001. – 43 p.

References (transliterated)

1. Volkov K. N., Emelyanov V. N. *Modelirovaniye krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Modeling of large vortices in turbulent flow computations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 368 p.
2. Ginevskiy A. S., Zhelannikov A. I. *Vikhrevye sledy samoletov* [Vortex traces of aircrafts]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 172 p.
3. Sokhats'kiy A. V. *Teoretichni osnovy stvorenniya aerodinamichnykh komponuvan' perspektivnykh shvydkisnykh transportnykh aparativ : dys. doktora tekhnichnykh nauk : 05.07.01* [Theoretical basis for creating aerodynamic layouts of perspective high-speed transport vehicles: thesis of the Doctor's dissertation, spec. : 05.07.01]. Dnipropetrovsk, 2010. 364 p.
4. Sokhats'kiy A. V. *Zastosuvannya syngulyarnykh integral'nykh rivnyan' dlya chysel'nogo modelyuvannya aerodynamiky nesuchykh system transportnykh zasobiv* [Using singular integral equations for numerical modeling of aerodynamics of transport vehicle bearing system]. *Visnyk Akademiyi mytnoyi sluzhby Ukrainy* [Bulletin of the Academy of Customs Service of Ukraine]. Dnipropetrovsk, AMSU Publ., 2006, vol. 3 (27), pp. 81–88.
5. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. 1992, vol. 0439. 21 p.
6. Van Leer B. Flux–vector splitting for the Euler equations. *Lecture Notes in Phys.* 1982, vol. 170, pp. 507–512.
7. Gerz T., Holzapfel F., Darracq D. Aircraft wake vortices. *WakeNet Position Paper*. 2001, 43 p.

Надійшла (received) 25.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Сохацький Анатолій Валентинович (Сохатский Анатолий Валентинович, Sokhatsky Anatoly Valentinovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів, провідний науковий співробітник, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, м. Дніпро; тел.: (097) 047-12-54; e-mail: Sokhatsky_anatoly@ukr.net.

УДК 532.5:534.7

Л. М. ТЕРЕЩЕНКО, В. А. ВОСКОБІЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ЧЕРЕЗ ДВОПЕЛЮСТКОВИЙ МЕХАНІЧНИЙ СЕРЦЕВИЙ КЛАПАН

Аналізуються результати експериментальних досліджень гідродинамічного шуму струменевої течії через відкритий та напівзакритий двопелюстковий механічний клапан серця. Вихрова та струменева течії нижче за потоком від протезу серцевого клапану є нелінійними, випадковими процесами. Такі процеси аналізуються за допомогою методів математичної статистики і теорії ймовірності. Обробка та аналіз результатів вимірювання полів пульсацій тиску, гідродинамічного шуму поблизу мітрального клапану і вібрацій моделей лівого шлуночка та лівого передсердя були виконані з визначенням статистичних моментів різного порядку.

Ключові слова: серцевий клапан, вихрова течія, гідродинамічний шум, пульсації тиску, бічний та центральний струмінь, статистичний аналіз.

Л. Н. ТЕРЕЩЕНКО, В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК
ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДВУХЛЕПЕСТКОВЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ СЕРДЕЧНЫЙ КЛАПАН

Анализируются результаты экспериментальных исследований гидродинамического шума струйного течения через открытый и полужакрытый двухлепестковый механический клапан сердца. Вихревые и струйные течения ниже по потоку от протеза сердечного клапана являются

© Л. М. Терещенко, В. А. Воскобийник, О. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, 2019

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 8 (1333) 2019.

нелинейними, случайными процессами. Такие процессы анализируются с помощью методов математической статистики и теории вероятности. Обработка и анализ результатов измерения полей пульсаций давления, гидродинамического шума вблизи митрального клапана и вибраций моделей левого желудочка и левого предсердия были выполнены с определением статистических моментов различных порядков.

Ключевые слова: сердечный клапан, вихревое течение, гидродинамический шум, пульсации давления, боковая и центральная струя, статистический анализ.

L. N. TERESHCHENKO, V. A. VOSKOBOINICK, O. A. VOSKOBOINICK, A. V. VOSKOBOINICK
PHYSICAL MODELING OF FLOW ACROSS THE BILEAFLET MECHANICAL HEART VALVE

Experimental results of hydrodynamic noise of the jet flow across an open and semi-closed bileaflet mechanical heart valve were analysed in the paper. The vortex and jet flows behind prosthetic heart valve are non-linear, random processes. Such processes are analyzed using the methods of mathematical statistics and probability theory. Processing and analysis of the experimental results of measuring the field of pressure fluctuations, hydrodynamic noise near the mitral valve, and vibrations of the left ventricle and atrium models were carried out with the determination of statistical moments of various orders.

Key words: heart valve, vortex flow, hydrodynamic noise, pressure fluctuations, side and central jet, statistical analysis.

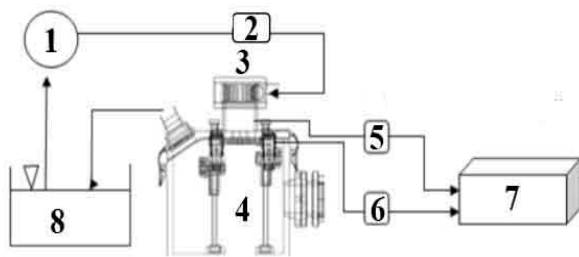
Вступ. Найбільш важливим в життєзабезпеченні людини є безперебійне функціонування серцево-судинної системи. Спрямоване перенесення крові по артеріям, венам, капілярам і іншим кровоносним судинам, яке забезпечується роботою серця і клапанами, які розташовано між передсерддями і шлуночками, дає можливість жити людині. Всередині серце поділене перегородками на чотири камери: два шлуночка і два передсердя (ліві і праві). Між ними розташовуються чотири клапани: *мітральний, трикуспідальний, аортальний і легеневий*. Клапани в певний момент відкриваються і закриваються, формуючи односпрямований рух крові, перешкоджаючи регургітації, тобто зворотному плину крові. Натуральні серцеві клапани складаються з тонких, гнучких пелюсток, які під час відкривання і закривання формують імпульсний кров'яний потік. Коли пелюстки серцевих клапанів пошкоджуються, то їх лікують або замінюють протезами. Наприклад, в США проводяться понад 80 тисяч операцій з пересадки серцевих клапанів щорічно, а в світі більше 300 тисяч таких операцій [1, 2]. Зараз для пересадки серцевих клапанів використовуються три види протезів, а саме, механічний, біопротезний, і гомотрансплантний клапани. В основному механічні клапани виробляються у вигляді двопелюсткових конструкцій, які складаються з кільця, яке підтримує дві рухомі пелюстки та пришивається до тканин серця [2, 3]. Але ці клапани мають істотний недолік – утворення тромбів на обтічній поверхні клапанів [4, 5]. Тромбоутворення в першу чергу і в більшості випадків спостерігається в місцях шарнірного кріплення пелюсток. З плином часу тромби перекривають прохідні перетини клапанів і закривають пелюстки. Це серйозно порушує роботу серцево-судинної системи людини і призводить до летальних наслідків. З метою запобігання такого положення треба діагностувати роботу механічних клапанів і приймати необхідні заходи для зменшення утворення тромбів як терапевтичними, так і хірургічними методами. У зв'язку з цим існує нагальна потреба в розробці і створенні ефективних методів і засобів діагностики роботи клапанів серця. Серед таких методів пропонується використовувати гідроакустичні вимірювання шумів і вібрацій роботи відкритого і напівзакритого двопелюсткового механічного клапана серця і на підставі цих вимірів виявити діагностичні ознаки, що підкреслює актуальність проведення таких досліджень.



Рис. 1 – Двопелюстковий механічний клапан серця: а – відкритий; б – розташування над блоком датчиків.

Метою цієї роботи є визначення статистичних характеристик вихрової та струменевої течії через відкритий і напівзакритий двопелюстковий механічний клапан серця, виявлення гідроакустичних відмінностей і діагностичних ознак визначення умов роботи клапана.

Постановка задачі, програма та методика досліджень. Фізичне моделювання течії та перекриття тромбами пелюсток механічних клапанів серця проводилося в лабораторних умовах в Технічному університеті "Politecnico di Milano" (Італія). Двопелюстковий механічний клапан серця (рис. 1, а) фірми "Sorin Biomedica Cardio" (Італія) діаметром $d = 25$ мм встановлювався в позицію мітрального клапана між моделлю лівого передсердя і моделлю лівого шлуночка серця [6, 7]. Дослідження проводилися для стаціонарної і пульсуючої течії чистої води і водного розчину гліцерину через відкритий і напівзакритий клапан. В якості задачі досліджень була поставлена мета визначення можливості використання вимірювань гідроакустичних і вібраційних характеристик шумів і вібрацій струменів, що витікають з відкритого і напівзакритого клапана, в якості діагностичних методів і ознак визначення особливостей роботи клапана.



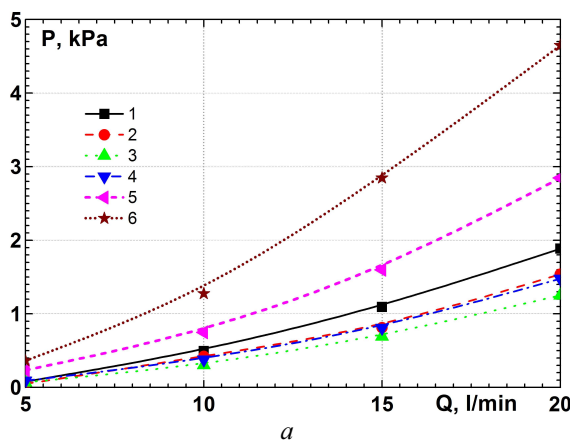
а



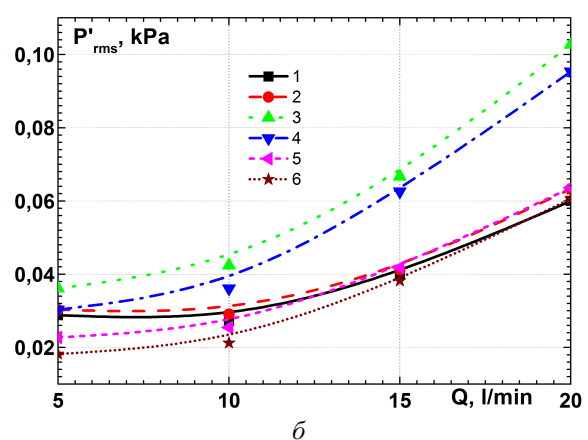
б

Рис. 2 – Експериментальний стенд: а – схема; б – фотографія.

Для вирішення цієї задачі були розроблені і виготовлені мініатюрні датчики тиску, шумів і прискорення. Датчики тиску встановлювалися в добре обтічний блок, який складався з п'яти датчиків пульсацій тиску і повного тиску, які монтувалися врівень з обтічною поверхнею цього блоку і розташовувалися на різних відстанях нижче за потоком від двопелюсткового клапана (рис. 1, б). Клапан знаходився в отворі між моделлю лівого передсердя (3) і моделлю лівого шлуночка серця (4) (рис. 2). Чиста вода або водний розчин гліцерину з відстійної камери (8) за допомогою помпи (1) подавалися в модель передсердя і через відкритий або напівзакритий клапан надходили в модель лівого шлуночка і далі у відстійну камеру. За відкритим двопелюстковим клапаном потік рідини через клапан розділявся на три струмені: один вузький центральний між пелюстками і два *напівмісячні бічні струмені* між пелюстками і кільцевою основою клапана. Датчики тиску (6), розташовуючись в блоці датчиків, за допомогою координатного пристрою пересувалися уздовж досліджуваних струменів, реєструючи їх гідродинамічний шум. На зовнішній поверхні вимірювальної ємності, що представляє собою моделі передсердя і шлуночка, встановлювалися *п'єзокерамічні датчики шумів серця* і *віброакселерометри* (5). Одночасна багаточотокова реєстрація тисків, шумів і вібрацій дозволила досліджувати просторово-часові характеристики гідроакустичних і вібраційних параметрів [8, 9]. Електричні сигнали датчиків підсилювалися, фільтрувалися і надходили через 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач на персональний комп'ютер, де за відповідними програмами і алгоритмами оброблялися і аналізувалися за допомогою апарату теорії ймовірності та математичної статистики.



а



б

Рис. 3 – Інтегральні характеристики поля тиску: а – середні значення тиску; б – середньоквадратичні значення пульсацій тиску.

Відомо, що збурення і нестійкості у відірваних та струменевих течіях, які обумовлені турбулентністю, являють собою випадкові процеси [10, 11]. Такі процеси досліджуються за допомогою статистичного аналізу, який відображає середню і очікувану поведінку характерних властивостей і гідродинамічних параметрів подібних течій. У формальному поданні випадкових процесів, векторна компонента швидкості або завихреності чи тиск мають певну ймовірність прийняття конкретного значення. В якості інтегральних величин результатів експериментальних досліджень визначалися середні значення або математичні очікування, функції щільності ймовірності появи випадкових величин, дисперсії і середньоквадратичні значення випадкових величин, коефіцієнти асиметрії та ексцесу.

Результати досліджень. Особливості струменевої та вихрової течії нижче за потоком від відкритого і напівзакритого двопелюсткового механічного мітрального клапана досліджувалися за стаціонарної течії чистої води і водного розчину гліцерину витратою від 5 л/хв до 20 л/хв. Такі витрати відповідають тим, які спостерігаються під час діастолі серцевого циклу роботи клапана. Середні значення і середньоквадратичні значення тиску всередині моделі лівого шлуночка серця і в моделі лівого передсердя показані на рис. 3.

Тут на рис. 3, а представлені результати вимірювання середнього тиску для течії чистої води через відкри-

тий і напівзакритий клапан. Крива 1 виміряна поблизу бічного струменя і крива 2 поблизу центрального струменя відкритого клапана, а криві 3 і 4 поблизу, відповідно, бічного і центрального струменя, але вже напівзакритого клапана. Крива 5 виміряна всередині передсердя або атріуму, коли клапан повністю відкритий, а крива 6 виміряна всередині атріуму для напівзакритого клапана. На рис. 3, б представлені результати вимірювання середньоквадратичних значень пульсацій тиску також для течії чистої води через відкритий і напівзакритий клапан. Позначення кривих на рис. 3, б відповідають тим, які представлені на рис. 3, а. Результати досліджень показують, що зі збільшенням витрати середні значення тиску і середньоквадратичні значення пульсацій тиску поблизу бічного струменя і всередині атріуму для умов роботи напівзакритого клапана вище, ніж для відкритого клапана.

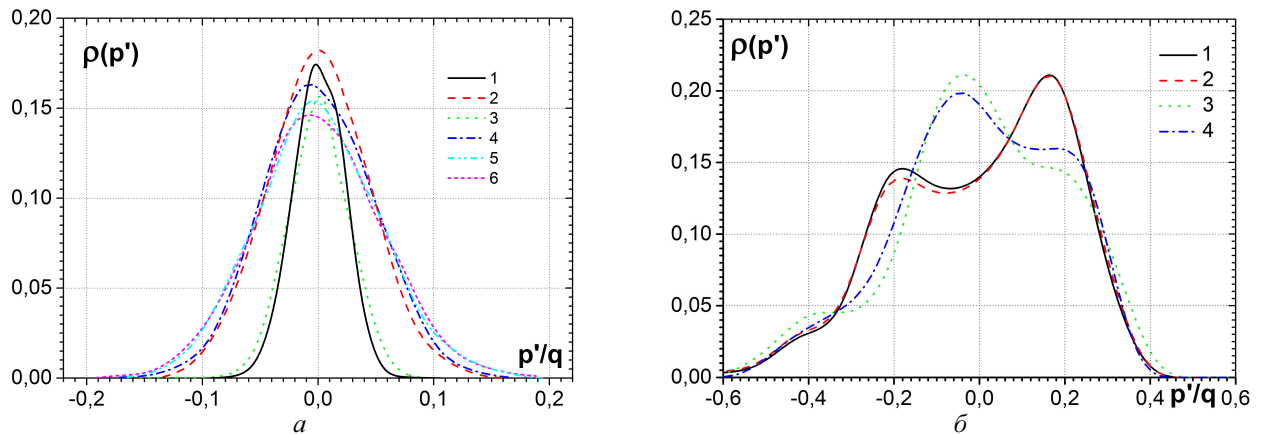


Рис. 4 – Функції щільності ймовірності пульсацій тиску: а – стаціонарна; б – пульсуюча течія рідини.

Функції щільності ймовірності пульсацій тиску поблизу бічного струменя відкритого і напівзакритого клапана, через який протікає стаціонарна і пульсуюча течії, показані на рис. 4. На рис. 4, а крива 1 представляє результати вимірювань пульсацій тиску поблизу бічного струменя течії чистої води витратою 15 л/хв через відкритий клапан, крива 2 отримана для таких же умов досліджень, але для напівзакритого клапана. Криві 3 – 6 виміряні для стаціонарної течії гліцеринового розчину різної концентрації. Так, крива 3 виміряна поблизу бічного струменя відкритого клапана, через який протікає розчин з 43 % гліцерину і 57 % води. Крива 4 виміряна для напівзакритого клапана і 35 % гліцерину у водному розчині, крива 5 (38 % гліцерину) і крива 6 (43 % гліцерину).

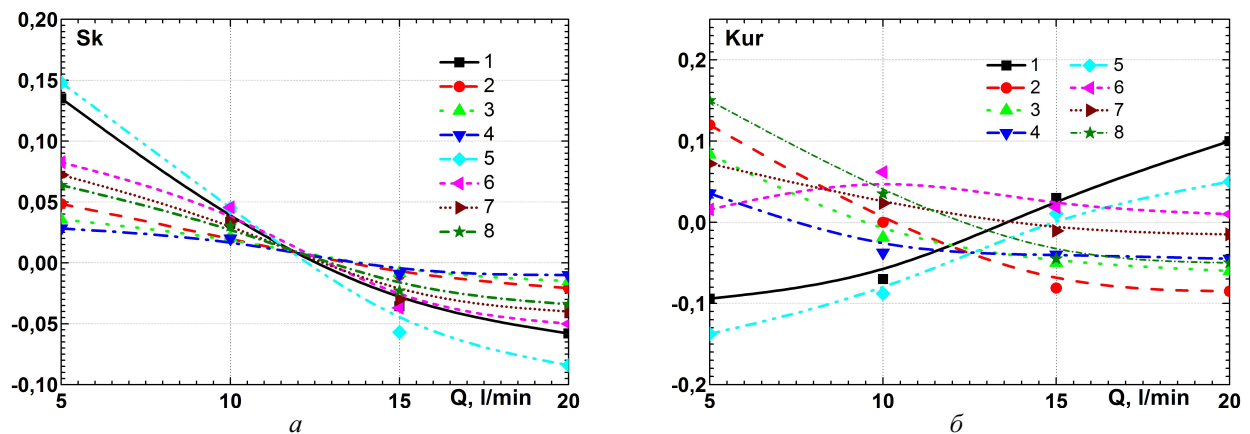


Рис. 5 – Коефіцієнти: а – асиметрії; б – ексцесу поля пульсацій тиску поблизу бічного струменя у ближньому сліді двопелюсткового мітрального серцевого клапана.

На рис. 4, б представлені результати вимірювання гідродинамічного шуму поблизу бічного струменя пульсуючої течії чистої води з частотою 1 Гц або 60 ударів за хвилину. Криві 1, 2 виміряні для умов відкритого клапана, а криві 3, 4 – для напівзакритого клапана. Крива 1 виміряна на відстані рівній діаметру (d) клапана, крива 2 виміряна на відстані $x = 1.2d$, крива 3 виміряна на відстані $x = d$, а крива 4 – на віддаленні $x = 1.2d$. Слід відмітити, що залежності на рис. 4, а характерні для випадкових процесів (дзвоноподібна форма кривої), а залежності на рис. 4, б являють собою сукупність випадкового процесу з коливальним процесом [10, 12]. Це не дивно, оскільки в пульсуючому потоці через відкритий або напівзакритий клапан на поле стохастичних пульсацій тиску струменевої та вихрової течії накладаються гармонійні коливання з частотою серцевого ритму. Пульсації тиску поблизу бічного струменя відкритого клапана незалежно від в'язкості рідини мають невисоку ймовірність появи пульсацій тиску великої амплітуди. Зі збільшенням в'язкості гліцеринового розчину істотно демпфуються пульсації тиску малої амплітуди поблизу бічного струменя стаціонарної течії через напівзакритий клапан, що наочно проілюстровано на рис. 4, а.

Зміни статистичних моментів вищих порядків, а саме, коефіцієнтів асиметрії та ексцесу показані на рис. 5. Гідродинамічний шум вимірювався в близькому сліді клапана поблизу бічного струменя для стаціонарної течії чистої води і водного розчину гліцерину. Тут криві 1 – 4 виміряні для умов відкритого клапана, а криві 5 – 8 – для напівзакритого клапана. Криві 1 і 5 отримані для течії чистої води, криві 2 і 6 – розчину з 35% гліцерину, криві 3 і 7 – розчину з 38% гліцерину і криві 4 і 8 – розчину з 43% гліцерину. Отже, для малої витрати рідини в полі пульсацій тиску превалюють позитивні значення пульсацій тиску, а зі збільшенням витрати збільшується ймовірність появи від'ємних пульсацій тиску, особливо для течії чистої води. *Гостровершинність* функції щільності ймовірності пульсацій тиску для умов течії чистої води і *неньютонівської рідини* з великою в'язкістю відрізняються одна від іншої (рис. 5, б). Так, для малих витрат в полі пульсацій тиску течії чистої води переважають пульсації тиску великої амплітуди, а зі збільшенням витрати води починають превалювати дрібномасштабні пульсації тиску. Протилежна тенденція спостерігається для течії водного розчину гліцерину, особливо коли його концентрація збільшується.

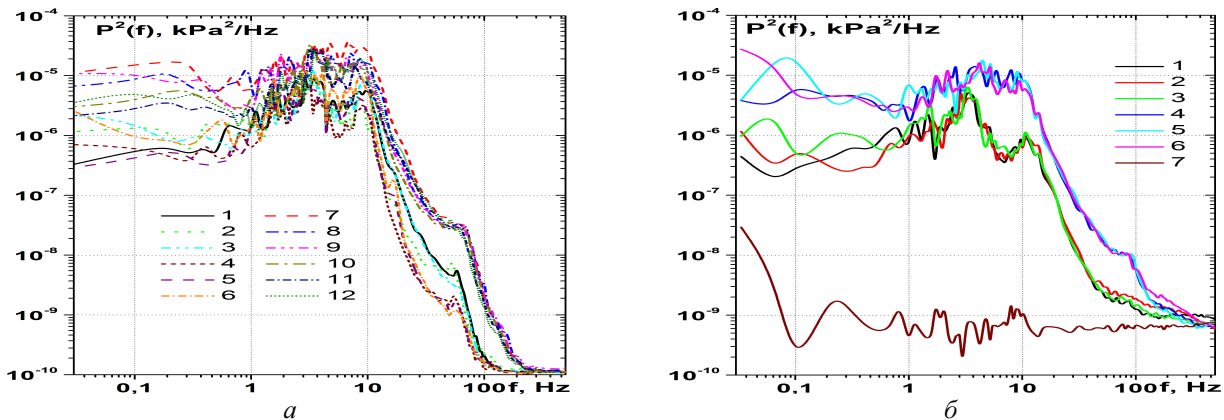


Рис. 6 – Спектральні щільності потужності пульсацій тиску поблизу бічного струменя: а – течія чистої води; б – течія водного розчину гліцерину через відкритий та напівзакритий двопелюстковий клапан серця.

Спектральні щільності потужності пульсацій тиску представлені на рис. 6 для різних умов проведення досліджень. Вимірювання проводилися поблизу бічного струменя стаціонарної течії чистої води і розчинів гліцерину різної концентрації через відкритий і напівзакритий двопелюстковий клапан серця. На рис. 6, а представлені спектри пульсацій тиску, виміряні уздовж бічного струменя на різних відстанях від клапана для течії чистої води витратою 20 л/хв. Криві 1 – 6 виміряні для відкритого клапана, а криві 7 – 12 – для напівзакритого клапана. Криві 1 і 7 зареєстровані на відстані $x = d$ від клапана, криві 2 і 8 – на відстані $x = 1.1d$, криві 3 і 9 – $x = 1.2d$, криві 4 і 10 – $x = 1.4d$, криві 5 і 11 – $x = 2.4d$ і криві 6 і 12 – $x = 3d$. Результати досліджень показують, що з віддаленням від клапана спектральні рівні пульсацій тиску зменшуються для умов роботи відкритого клапана, а для напівзакритого клапана спадання – незначне, особливо в області високих частот. Інтенсивність пульсацій тиску поблизу бічного струменя для напівзакритого клапана в (3 – 4) рази вища, ніж для відкритого клапана.

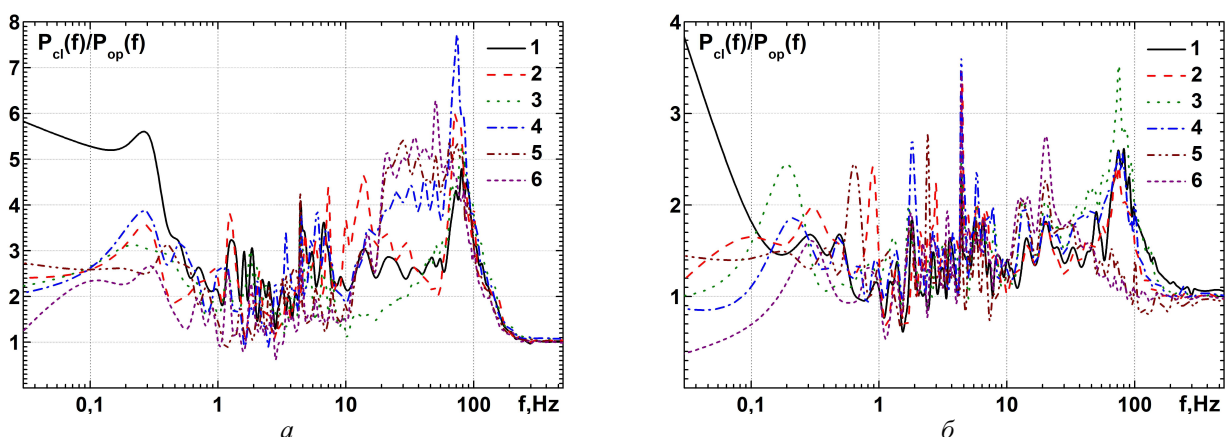


Рис. 7 – Відношення спектральних щільностей потужності пульсацій тиску течії води через напівзакритий клапан до відкритого клапана: а – поблизу бічного струменя, б – поблизу центрального струменя.

Спектральні щільності потужності пульсацій тиску поблизу бічного струменя течії водного розчину гліцерину (43% гліцерину і 57% води) через відкритий і напівзакритий клапан представлені на рис. 6, б. Тут криві 1 – 3 виміряні для відкритого клапана, криві 4 – 6 – для напівзакритого клапана, а крива 7 – це навколишній шум. Криві 1 і 4 отримані в близькому сліді клапана на віддаленні $x = d$ від клапана, криві 2 і 5 – $x = 1.1d$ і криві 3 і 6 – $x = 1.2d$. Тут, як і на рис. 6, а, спостерігається істотна різниця в спектрах пульсацій тиску для напівзакритого

і відкритого клапана, що пропонується використовувати під час діагностики тромбоутворення на обтічній поверхні серцевого клапана. Результати досліджень показали, що інтенсивність пульсацій тиску поблизу бічного струменя в ближньому сліді напівзакритого клапана вище, ніж відкритого клапана.

На рис. 7 представлені відношення рівнів спектральних складових пульсацій тиску, які виміряні для витрати води 20 л/хв через напівзакритий клапан до тих, які виміряні через відкритий клапан. На рис. 7, а показані відношення спектральних рівнів поблизу бічного струменя, а на рис. 7, б – поблизу центрального струменя. Виміри проведені вздовж цих струменів і крива 1 виміряна на віддаленні від клапана на відстань $x = d$, крива 2 на відстань $x = 1.1d$, крива 3 – $x = 1.2d$, крива 4 – $x = 1.4d$, крива 5 – $x = 2.2d$ і крива 6 – $x = 3d$. Результати досліджень показали, що з віддаленням від клапана різниця спектральних рівнів в гідродинамічному шумі напівзакритого клапана і відкритого клапана поступово зменшується. При цьому різниця спектрів зберігається більшою поблизу бічного струменя і залишається в (2 – 3) рази вище в частотному діапазоні від 0.1 Гц до майже 100 Гц. Слід також зазначити, що гідродинамічний шум поблизу бічного струменя напівзакритого клапана вище в (4 – 5) разів в частотному діапазоні (30 – 80) Гц, ніж поблизу того ж бічного струменя, але відкритого клапана (рис. 7, а). Така велика різниця в спектральних рівнях в цьому частотному діапазоні може бути використана під час гідроакустичної діагностики роботи двопелюсткового механічного клапана серця.

Висновки. Результати досліджень показали, що статистичний аналіз експериментальних даних досліджень гідроакустичних характеристик струменевої та вихрової течії вниз за потоком від двопелюсткового механічного клапана серця є ефективним засобом під час діагностики умов роботи клапана.

Установлено, що інтегральні, а особливо спектральні характеристики полів швидкості, тиску та прискорення мали суттєві відмінності в умовах роботи напівзакритого клапана (моделювання дії тромбів на пелюстки клапана) і відкритого клапана.

Показано вплив в'язкості рідини на пульсації пристінного тиску струменевої течії в ближньому сліді двопелюсткового клапана. Виявлено відмінності в гідродинамічних характеристиках стаціонарного та пульсуючого обтікання відкритого і напівзакритого клапана. Установлено, що гідродинамічний шум напівзакритого клапана в кілька разів вище, ніж відкритого клапана, що особливо явно простежується в різних частотних діапазонах спектру пульсацій тиску в залежності від умов роботи двопелюсткового механічного клапана серця.

Список літератури

1. Jun B. H., Saikrishnan N., Yoganathan A. P. Micro particle image velocimetry measurements of steady diastolic leakage flow in the hinge of a St. Jude medical regent mechanical heart valve // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2014. – Vol. 42. – P. 526 – 540.
2. Sotiropoulos F., Le T. B., Gilmanov A. Fluid mechanics of heart valves and their replacements // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2016. – Vol. 48. – P. 259 – 283.
3. Kheradvar A., Groves E. M., Goergen C. J., Alavi S. H., Tranquillo R., Simmons C. A., Dasi L. P., Grande-Allen K. J., Mofrad M. R. K., Falahatpisheh A., Griffith B., Baaijens F., Little S. H., Canic S. Emerging trends in heart valve engineering : Part III. Novel technologies for mitral valve repair and replacement // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2015. – Vol. 43. – № 4. – P. 858 – 870.
4. Sadoon H., Bassam A. L. Incidence of major bleeding in patients with mechanical heart valve and warfarin : A one year study // *Int. J. Adv. Res.* – 2018. – Vol. 6. – № 2. – P. 622 – 624.
5. Fiedler A. G., Tolis Jr. G. Surgical treatment of valvular heart disease : Overview of mechanical and tissue prostheses, advantages, disadvantages, and implications for clinical use // *Curr. Treat. Options Cardio Med.* – 2018. – Vol. 20. – № 7. – P. 7-1-13.
6. Voskoboinick V. A., Redaelli A., Chertov O. R., Fiore G. B., Voskoboinick A. V., Rudnitskii A. H., Tereshchenko L. M., Siryk S. V., Lucherini F. Effect of fluid viscosity on noise of bileaflet prosthetic heart valve // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2017. – № 5. – С. 41 – 50.
7. Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. A., Voskoboinick A. V., Лукерини Ф., Редаелли А., Терещенко Л. Н., Фиоре Б. Струйное течение и шум открытого механического двухстворчатого сердечного клапана // *Гідродинаміка і акустика*. – 2018. – Т. 1. – № 1. – С. 7 – 32.
8. Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Correlation characteristics of a wall pressure fluctuation field in a turbulent boundary layer induced by a longitudinal flow along a flexible extended cylinder // *Intern. J. Fluid Mech.* - 2003. – Vol. 30. – № 6. – P. 644 – 650.
9. Voskoboinick V. A., Makarenkov A. P. Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder // *Intern. J. Fluid Mech.* – 2004. – Vol. 31. – № 1. – P. 87 – 100.
10. Бендат Дж., Пірсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
11. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М. : Высшая школа, 2000. – 383 с.
12. Tereshchenko L., Voskoboinick V., Kudybin I., Voskoboinick A., Rudnyskiy O. Statistical analysis of jet flow noise across bileaflet heart valve // *Abstract Final AMMODIT Conf. "Mathematics for Life Sciences"*. – Kyiv, Ukraine, 2019. – P. 52 – 53.

References (transliterated)

1. Jun B. H., Saikrishnan N., Yoganathan A. P. Micro particle image velocimetry measurements of steady diastolic leakage flow in the hinge of a St. Jude medical regent mechanical heart valve. *Annals of Biomedical Engineering*. 2014, vol. 42, pp. 526–540.
2. Sotiropoulos F., Le T. B., Gilmanov A. Fluid mechanics of heart valves and their replacements. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2016, vol. 48, pp. 259–283.
3. Kheradvar A., Groves E. M., Goergen C. J., Alavi S. H., Tranquillo R., Simmons C. A., Dasi L. P., Grande-Allen K. J., Mofrad M. R. K., Falahatpisheh A., Griffith B., Baaijens F., Little S. H., Canic S. Emerging trends in heart valve engineering : Part III. Novel technologies for mitral valve repair and replacement. *Annals of Biomedical Engineering*. 2015, vol. 43, no. 4, pp. 858–870.
4. Sadoon H., Bassam A. L. Incidence of major bleeding in patients with mechanical heart valve and warfarin : A one year study. *Int. J. Adv. Res.* 2018, vol. 6, no. 2, pp. 622–624.
5. Fiedler A. G., Tolis Jr. G. Surgical treatment of valvular heart disease : Overview of mechanical and tissue prostheses, advantages, disadvantages, and implications for clinical use. *Curr. Treat. Options Cardio Med.* 2018, vol. 20, no. 7, pp. 7-1-13.
6. Voskoboinick V. A., Redaelli A., Chertov O. R., Fiore G. B., Voskoboinick A. V., Rudnitskii A. H., Tereshchenko L. M., Siryk S. V., Lucherini F. Effect of fluid viscosity on noise of bileaflet prosthetic heart valve. *Naukovi visti NTUU "KPI"* [Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»]. 2017, no. 5, pp. 41–50.
7. Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. A., Voskoboinick A. V., Lucherini F., Redaelli A., Tereshchenko L. N., Fiore B. Struynoe techenie i schum otkrytogo mekhanicheskogo dvukhstvorchatogo serdechnogo klapana [Jet flow and noise of open mechanical bileaflet heart valve].

- Gidrodynamika i akustyka* [Hydrodynamics and Acoustics]. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 7–32.
8. Voskoboinick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Correlation characteristics of a wall pressure fluctuation field in a turbulent boundary layer induced by a longitudinal flow along a flexible extended cylinder. *Intern. J. Fluid Mech.* 2003, vol. 30, no. 6, pp. 644–650.
 9. Voskoboinick V. A., Makarenkov A. P. Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder. *Intern. J. Fluid Mech.* 2004, vol. 31, no. 1, pp. 87–100.
 10. Bendat J., Pirsol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannyykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
 11. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 383 p.
 12. Tereshchenko L., Voskoboinick V., Kudybin I., Voskoboinick A., Rudnyskiy O. Statistical analysis of jet flow noise across bileaflet heart valve. *Abstract Final AMMODIT Conf. "Mathematics for Life Sciences"*. Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 52–53.

Надійшла (received) 11.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Терещенко Лідія Миколаївна (Терещенко Лидия Николаевна, Tereshchenko Lidiia Nikolaevna) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-45; e-mail: litere70@gmail.com.

Воскобойник Володимир Анатолійович (Воскобойник Владимир Анатольевич, Voskoboinick Vladimir Anatolievich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

Воскобойник Олександр Анатолійович (Воскобойник Александр Анатольевич, Voskoboinick Oleksandr Anatoliyovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

Воскобойник Андрій Володимирович (Воскобойник Андрей Владимирович, Voskoboinick Andrew Vladimirovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

УДК 629.7.017

В. А. УДОВЕНКО, А. И. ГЛАДЫШЕВ**АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЁТА В СПУТНОМ СЛЕДЕ ДРУГОГО ВЕРТОЛЁТА**

Исследовано влияние спутного вихревого следа вертолёта на аэродинамические характеристики несущего винта другого вертолёта. Используются математические модели ближнего и дальнего следа. Для ближнего следа проводится численное моделирование обтекания несущих винтов вертолётов методом дискретных вихрей. Модель дальнего следа учитывает затухание и разрушение следа вследствие турбулентности атмосферы, силы вязкого трения и выталкивающей силы Архимеда. Приращения аэродинамических характеристик винта вертолёта в следе по сравнению с полётом вне следа вычисляются с использованием результатов расчётов по обёмным моделям.

Ключевые слова: вертолёт, спутный след, аэродинамические характеристики, метод дискретных вихрей, турбулентность, вязкое трение, сила Архимеда.

В. О. УДОВЕНКО, А. І. ГЛАДИШЕВ**АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСУЧОГО ГВИНТА ВЕРТОЛЬОТА У СУПУТНЬОМУ СЛІДІ ІНШОГО ВЕРТОЛЬОТА**

Досліджений вплив супутнього вихрового сліду вертольота на аеродинамічні характеристики несучого гвинта іншого вертольота. Використані математичні моделі ближнього та дальнього сліду. Для ближнього сліду проводиться числове моделювання обтікання несучих гвинтів вертольотів методом дискретних вихорів. Модель дальнього сліду враховує загасання й руйнування сліду внаслідок турбулентності атмосфери, сили в'язкого тертя та виштовхуючої сили Архімеда. Прирости аеродинамічних характеристик гвинта в сліді у порівнянні з польотом поза слідом вираховуються з використанням результатів розрахунків за обома моделями.

Ключові слова: вертоліт, супутній слід, аеродинамічні характеристики, метод дискретних вихорів, турбулентність, в'язке тертя, сила Архімеда.

V. A. UDOVENKO, A. I. GLADYSHEV**AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE HELICOPTER MAIN ROTOR IN THE WAKE OF ANOTHER HELICOPTER**

The influence of vortex wake of the helicopter on the aerodynamic characteristics of another helicopter's main rotor is investigated. The mathematic models of near and far vortex wake are used. For the near wake the numerical modeling of the flow about both helicopters' main rotors is carried out by the method of discrete vortices. The far wake model accounts for damping and wake destruction due to the atmosphere turbulence, viscous friction force, and Archimedean buoyant force. Increments of aerodynamic characteristics of the rotor of the helicopter in the wake compared with the flight out of the wake are computed using results of the calculations according to the both models.

Key words: helicopter, wake, aerodynamic characteristics, method of discrete vortices, turbulence, viscous friction, Archimedean buoyant force.

© В. А. Удовенко, А. И. Гладышев, 2019