

**АНАЛІЗ ОБТІКАННЯ КУЛІ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ ЯК ПЕРШЕ
НАБЛИЖЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КРИЛОПОДІБНИХ ПРОФІЛІВ
ОРТОГОНАЛЬНИХ ВІТРОДВИГУНІВ**

А. А. Папченко, канд. техн. наук;

В. М. Липовий, аспірант;

О. О. Барикін, студент,

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна

E-mail: info@pgam.sumdu.edu.ua

У статті наведено результати чисельного визначення коефіцієнту лобового опору при обтіканні кулі потоком повітря з різними числами Рейнольдса на основі програмного комплексу ANSYS CFX. Виконано порівняльний аналіз отриманої графічної залежності з експериментальними даними. Отримані картини течії в розрахунковій області. На основі візуалізації потоку приведено опис фізичного процесу в зоні пограничного шару на тілі досліджуваного об'єкта.

***Ключові слова:** сфера, число Рейнольдса, лобовий опір, візуалізація, обтікання.*

ВСТУП

Дослідження обтікання твердої стінки потоком нестисливої або стисливої рідини представляє значну зацікавленість науковців в багатьох галузях техніки. При розробці насосного та компресорного обладнання особливо увага надається створенню вісесиметричних потоків, зменшення вихрових зон та забезпечення безвідривних течій в проточних частинах агрегатів. Визначальним фактором для дотримання цих характеристик потоку є вплив робочих органів на поведінку рідини. Тому виникає необхідність моделювання обтікання твердих стінок різної форми.

На сьогоднішній день існує методика аналітичного розрахунку основних характеристик тіл (що мають складний характер обтікання, наприклад, кулі) при поперечному обтіканні. Але робочі органи турбомашин, як правило, мають складну просторову геометрію, для дослідження обтікання якої необхідно проводити натурні експерименти та послідовну доводку за даними цих експериментів.

Розвиток мікропроцесорної техніки дозволяє внести певні зміни в процес розробки турбомашин та зменшити матеріальні та часові витрати на їх доводку. Сьогодні у насособудуванні для проектування проточних частин широко використовується програмний комплекс (ПК) ANSYSCFX. Моделювання робочого процесу відцентрових насосів з використанням даного комплексу дозволяє отримати характеристики з похибкою 5–7 %.

На кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету розроблена методика числового моделювання робочого процесу ортогональних вітрових двигунів (ОВД), отримані основні характеристики та проведено порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних залежностей. Отримані дані дозволяють визначити основні енергетичні показники ортогональних вітряків з похибкою 10–12 %. Отримання більш точних результатів вимагає певного прилаштування ПК для вирішення аеродинамічних задач. За таких умов було прийнято рішення виконати цей етап шляхом дослідження тестових задач. У якості таких тестових задач було обрано розрахунок обтікання потоком повітря сферичної кулі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження обтікання кулі та прогнозування поведінки потоку рідини в зонах наближених до твердої стінки описано в роботі Ушакова В. М. [1]. В ній основні розрахунки проводилися з використанням комплексу SolidWorks. Отримані доволі точні значення сили лобового опору при заданих числах Рейнольдса та картини течії. Але розв'язання подібних задач на базі даного комплексу для більш складних потоків зі складною геометрією досліджуваного об'єкта збільшує похибку кінцевих результатів та унеможливорює отримання достовірних картин течії.

В роботі [2] проведено дослідження зон відриву тороподібного вихору з тильної сторони сфери. В отриманих результатах зображено взаємне розташування окремих вихорів у турбулентному сліді за об'єктом. Розрахунки проведені шляхом прямого інтегрування рівняння Нав'є-Стокса. При виконанні даної роботи виникли проблеми при розгляданні зон турбулентності.

Дослідження зони різкого зменшення сили лобового опору при критичних значеннях числа Рейнольдса та визначення градієнтів швидкості в точках з різними полярними координатами розглянуто в роботі [3].

Проведення моделювання обтікання кулі з використанням ПК ANSYS CFX дає можливість використання різних моделей турбулентності, які розроблені безпосередньо для розрахунку обтікання твердих стінок потоком газу, тобто для аеродинамічних розрахунків, та можливість точного зображення картин течії. Порівняння розрахункових результатів з раніше отриманими експериментальними дозволить обрати найбільш оптимальний метод розрахункового моделювання обтікання профілів лопатей ортогональних вітродривунів.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Оскільки основним робочим органом ОВД є лопать певного профілю, то для вдосконалення аеродинамічних характеристик (АХ) вітрової турбіни виникла необхідність моделювання обтікання потоком повітря окремої лопаті з метою отримання картин течії та подальшої модернізації геометричних параметрів профілю. Вказану задачу не вдається вирішити з використанням раніше отриманої методики оскільки дослідження обтікання окремої лопаті представляє більш складний характер. На картину течії значною мірою впливає поведінка робочого середовища поблизу твердої стінки, що визначає поля швидкостей та, як наслідок, поля тисків на поверхні профілю.

Відсутність достатньої кількості досліджень пограничного шару не дозволяє провести аналітичний розрахунок аеродинамічних характеристик профілів складної форми. Тому виникла потреба створення робочої методики моделювання обтікання профілів складної форми потоком повітря. В якості початкової стадії для вирішення цього питання поставлена задача числового розрахунку поперечного обтікання потоком повітря сферичного тіла типу куля. Наявність експериментальних залежностей коефіцієнту лобового опору C_x , як функції числа Рейнольдса $ReC_x=f(Re)$ дають змогу провести порівняння цих даних зі значеннями отриманими численним моделюванням.

Математична модель. Для вирішення встановленої задачі необхідно провести розрахунок рівнянь Нав'є-Стокса для розрахункової області, що представляє собою модель аеродинамічної труби, в якій розміщується куля. Розрахунок проводиться з використанням методу кінцевих елементів. Створена просторова модель розбивається на певну кількість комірок тетраїдної форми, кількість та взаємне розташування яких впливає на якість розрахунку, що в подальшому є визначальним для

похибки між отриманими числовим шляхом та експериментальними даними.

Оскільки діапазон числа Рейнольдса лежить в межах 10^{-2} – 10^7 , то використовується дві моделі турбулентності: ламінарна ($10^{-2} \text{ Re } 103$) та Shear Stress Transport (SST) ($\text{Re} > 103$).

Моделювання з використанням SST моделі турбулентності включає вирішення наступних рівнянь:

- кінематична турбулентна в'язкість:

$$1 - \nu_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega_1 S F_2)};$$

- турбулентна кінетична енергія:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right];$$

- показник дисипації:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S_2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Коефіцієнти та константи:

$$F_2 = \tan \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta \omega y} \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right];$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} 10 \beta k \omega \right);$$

$$F_1 = \tan \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta \omega y} \frac{500}{y^2 \omega} \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right] \right\}^4 \right\};$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9} \alpha_2 = 0,44;$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40},$$

$$\beta_2 = 0,0828, \beta = \frac{9}{100}, \sigma_{k1} = 0,85, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 1} = 0,5, \sigma_{\omega 2} = 0,856.$$

Результат роботи програми. При моделюванні процесу обтікання потоком повітря кулі отримано графічну залежність $C_x = f(\text{Re})$. На рис. 1 зображено взаємне розташування експериментальної залежності [4] та залежності отриманої числовим моделюванням.

Розрахунковим шляхом отримані картини течії в розрахунковій області та в зоні пограничного шару, що дає змогу визначити зони відриву потоку від твердої стінки та проаналізувати характер вихорутворень при різних числах Рейнольдса.

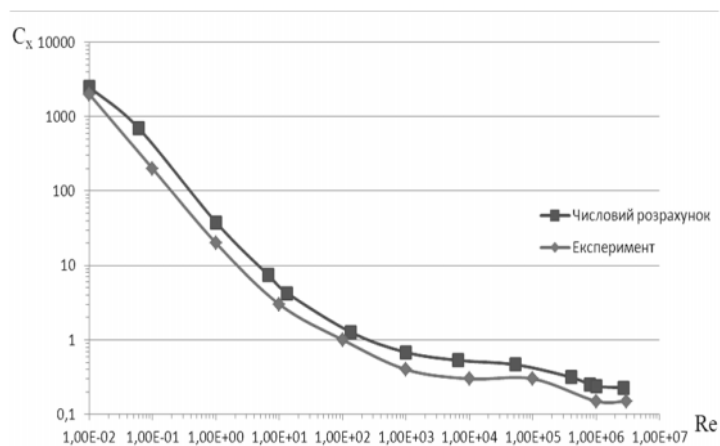


Рисунок 1 – Порівняльна характеристика експериментальної та отриманої числим моделюванням залежностей $C_x=f(Re)$

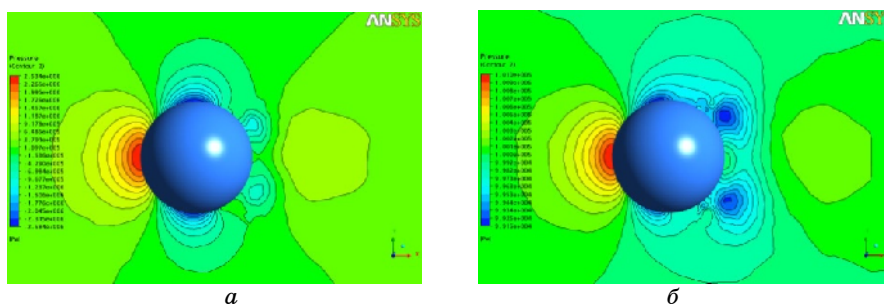


Рисунок 2 – Поля тиску: а – $Re=53300$; б – $Re=2670000$

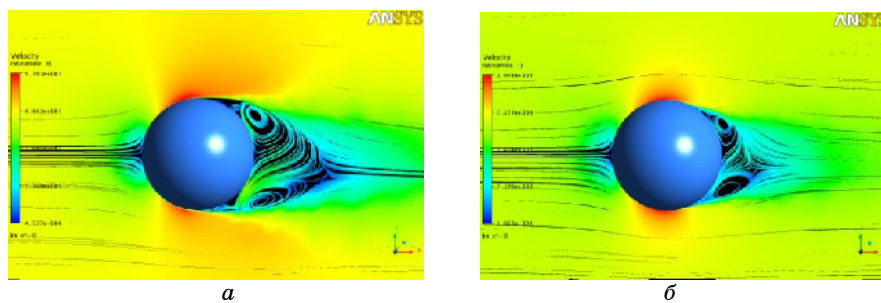


Рисунок 3 – Лінії току: а – $Re=53300$; б – $Re=2670000$

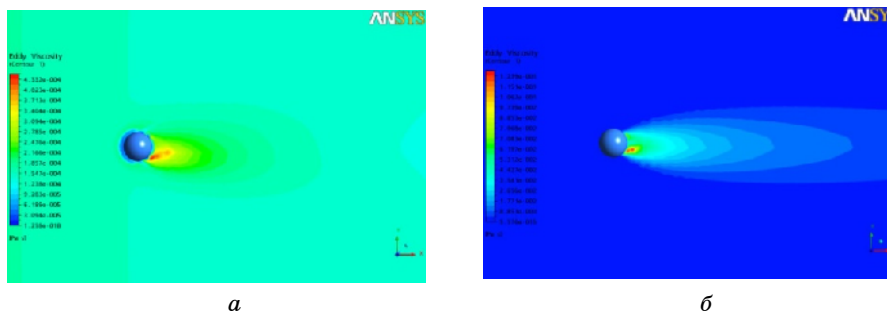


Рисунок 4 – Кінематична в'язкість: а – $Re=53300$; б – $Re=2670000$

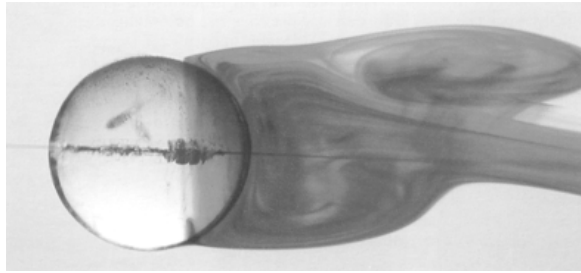


Рисунок 5 – Експериментально отримана картина відриву вихору з твердої стінки кулі [5]

На рис. 2, 3 видно збільшення тиску в лобовій частині та зменшення вихрової зони на тильній стороні сфери (причиною того є зміщення точки відриву в сторону протилежну набігаючому потоку) при збільшенні числа Re , що відповідає реальним умовам обтікання. Стаціонарне вирішення задачі не дає змогу отримати цілісний вихровий слід за досліджуванним об'єктом та показати формування доріжки Кармана, але на зображенні ліній току просліджується чітке формування двох вихрових зон у місцях відриву потоку від твердої стінки. Сходження вихорів не є симетричним, що є підтвердженням парадоксу симетрії [6]. При збільшенні числа Рейнольдса вплив сил в'язкості на потік зменшується і, як наслідок, відбувається збільшення турбулізації потоку за досліджуванним об'єктом.

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оскільки даний розрахунок є першим наближенням для визначення основних АДХ профілів лопатей ортогональних вітродриву, то наступними кроками в вирішенні даної проблематики є дослідження об'єктів більш складної геометрії. Перехідним етапом в цьому напрямку виступає моделювання обтікання потоком газу кругового циліндра.

В подальшому планується провести числовий експеримент для крилових профілів NASA для яких отримані АДХ в аеродинамічних трубах та виконати аналіз працездатності комплексу на добреобтічних тілах.

Кінцевий етап – можливість створення профілів лопатей ортогональних вітродриву на базі числового моделювання. Корегування характеристик вітротурбін шляхом зміни геометричних параметрів лопатей та прогнозування АДХ реальних установок.

ВИСНОВКИ

Із порівняння характеристики $C_x=f(Re)$ отриманої методом числового моделювання процесу обтікання кулі потоком повітря з експериментальною залежністю можна зробити висновок, що використання ПК ANSYS CFX дає змогу прогнозувати поведінку рідини в пограничному шарі. При числах Рейнольда, що відповідають турбулентному потоку, доцільним є застосування Shear Stress Transport моделі турбулентності.

Картини течії та поля тиску відповідають дійсності. Це є одним із найважливіших висновків проведеного дослідження, оскільки в подальшому при моделюванні обтікання профілів складної форми саме за допомогою візуалізації будуть визначатися зони різких змін параметрів потоку. Саме вони значною мірою впливають на характеристики профілів. Тому є можливість з певною похибкою аналізувати вплив геометричних параметрів окремих частин лопаті на АДХ вітродриву.

**АНАЛИЗ ОБТЕКАНИЯ ШАРА ПОТОКОМ ВОЗДУХА КАК ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КРЫЛОВИДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

А. А. Папченко, В. Н. Липовый, А. А. Барыкин,
Сумский государственный университет,
ул. Рижского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина;
E-mail: info@pgam.sumdu.edu.ua

В статье приведены результаты численного определения коэффициента лобового сопротивления при обтекании сферы потоком воздуха с разными числами Рейнольдса на базе программного комплекса ANSYS CFX. Проведен сравнительный анализ полученной графической зависимости с экспериментальными данными. Получены картины течения в расчетной области. На основе визуализации потока приведено описание физического процесса в зоне пограничного слоя на теле исследуемого объекта.

Ключевые слова: сфера, число Рейнольдса, лобовое сопротивление, визуализация, обтекание.

**ANALYSIS OF THE AIRFLOW ABOUT SPHERE AS A FIRST APPROXIMATION
TO DETERMINE THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIRFOIL PROFILES
OF ORTHOGONAL WIND TURBINES**

A. Papchenko, V. Lipovy, O. Barikin,
Sumy State University,
2, R-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine;
E-mail: info@pgam.sumdu.edu.ua

Numerical modeling calculations of the head resistance coefficient for the sphere flow with an air flux presented with different Reynolds numbers using software ANSYS CFX is shown. Obtained curves are compared to experimental data and it is confirmed that described flow patterns are in rated operating conditions. According to the flux visualization data we described a physical process in the boundary layer of the prototype system.

Key words: the sphere, Reynolds number, a head resistance, visualization, the flow.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ушаков В. М. Анализ обтекания тел с отрывным потоком в системе Solid Works / Flow Works / В. М. Ушаков // Машиностроение и смежные области. – 2003. – С. 2–9.
2. Лебедь В. И. Возникновение и развитие турбулентности при обтекании сферы. Проблемы и существующие подходы к их решению / В. И. Лебедь, С. Я. Уманский // Химическая физика. – 2007. – № 1. – С. 65–88.
3. Симаков Н. Н. Расчет обтекания шара в ламинарном и сильно турбулентном потоках / Н. Н. Симаков // Журнал технической физики. – 2013. – № 4. – С. 16–20.
4. Коган В. Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В. Б. Коган. – М., 1977. – С. 128.
5. Johnson T. A. Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300 / T. A. Johnson, V. S. Patel // J. Fluid Mech. – 1999. – V. 378. – P. 19-70.
6. Бетяев С. К. Гидродинамические парадоксы /С. К. Бетяев // Квант. – 1998. – № 1. – С. 5–9.

Надійшла до редакції 3 квітня 2013 р.