

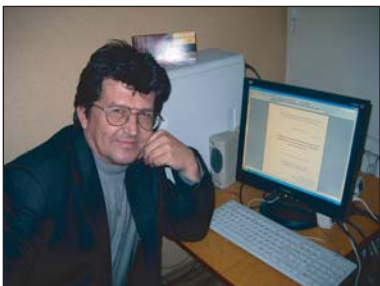


Сергій Тарасов
канд. техн. наук,
начальник відділу Інституту
транспортних систем і технологій
НАН України,
м. Дніпропетровськ



Дмитро Редич
канд. фіз.-мат. наук,
стар. наук. співр. Інституту
транспортних систем і технологій
НАН України, м. Дніпропетровськ

Степендіант НАН України 2006-2008 рр.
Степендіат
Президента України 2010 р.



Олег Польовий
мол. наук. співр. Інституту
транспортних систем і технологій
НАН України,
м. Дніпропетровськ

ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ГІДРОДИНАМІКА

НА СЛУЖБІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ



Вітроенергетика належить до нетрадиційних видів енергетики, тому що у нас немає традицій берегти навколишнє середовище.

Сучасний стан і тенденції розвитку вітроенергетики у світі та в Україні

Економіка України істотно залежить від зовнішніх поставок енергоносіїв. Для розвитку ядерної енергетики після Чорнобиля необхідне створення АЕС нового покоління, які відповідають підвищеним вимогам ефективності, безпеки й екологічності, що вимагає міжнародного співробітництва.

До одного з перспективних напрямків підвищення енергетичної безпеки України належить вітроенергетика. У найближче десятиліття вітроенергетика може стати конкурентоспроможним джерелом найдешевшої електроенергії, що виробляється у промислових масштабах.

За оцінками Американської вітроенергетичної асоціації (American Wind Energy Association — AWEA) до 2008 року в усьому світі було встановлено близько 120 000 МВт вітроелектрогенерувальних потужностей. Вартість 1 кВт·г вітрової електроенергії у 1980 році становила 40 центів, а в 2008 році — 5-6 центів. Євросоюз домінує на світовому ринку вітроенергетики за кількістю введених в експлуатацію вітроенергетичних установок (ВЕУ) 33,3 % чи 40 000 МВт (рис. 1). Лідерами на світовому ринку є США, Німеччина, Іспанія (рис. 2). Частка України становить сім сотих відсотка від світового обсягу за номінально заявленими потужностями. Потужностей, які реально працюють, ще менше.

Залежно від орієнтації осі обертання стосовно напрямку потоку вітру ВЕУ можна розділити на два основні класи: *горизонтально-осьові (ГО)* (рис. 3а) і *вертикально-осьові (ВО)* (рис. 3б). Горизонтально-осьовою називається

установка, вісь обертання якої збігається з напрямком потоку вітру. У вертикально-осьових ВЕУ вісь перпендикулярна до потоку. Найбільше розповсюдженими представниками цього класу є *ротори Дар'є та Савоніуса* (рис. 4а та 4б, відповідно).

Зараз основу вітроенергетики становлять ГО ВЕУ. На їхню частку припадає близько 85 % електроенергії, що виробляється. Однією з причин значного поширення ГО ВЕУ є добре розуміння їхньої аеродинаміки. Це зворотна пропелерна задача, добре відпрацьована з початку ХХ ст. Водночас лопаті ГО ВЕУ мають складний профіль, що призводить до дорогої технології їхнього виробництва. ГО ВЕУ експлуатуються при досить великих швидкостях вітру, близько 10-15 м/с. Закордонний досвід показує, що при швидкостях вітру $U < 5$ м/с їхня експлуатація стає нерентабельною.

В Україні існує всього два регіони, які задовольняють умовам експлуатації ГО ВЕУ — Карпати та Південь України (Приазов'я та Причорномор'я). Загальний енергетичний вітровий потенціал в Україні — помірний. Тому не можна механічно переносити закордонні розробки на територію України. Це може призвести до комерційно провальних проектів. Негативний досвід щодо цього вже є. Тут потрібні раціональні технічні рішення!

На наш погляд, альтернативою для України є вертикально-осьові ВЕУ. До переваг ВО ВЕУ можна віднести: низький поріг робочої швидкості вітру, відсутність механізму орієнтації на вітер, менший рівень експлуатаційних витрат, простота форми лопаті, зниканий рівень шуму. За нашими оцінками, реальне створення недорогих і надійних ВО ВЕУ, які працюють у рам-

ках помірного вітропотенціалу України. Одна з основних проблем — недостатній рівень розуміння аеродинамічних процесів ВО ВЕУ через їхню малу вивченість.

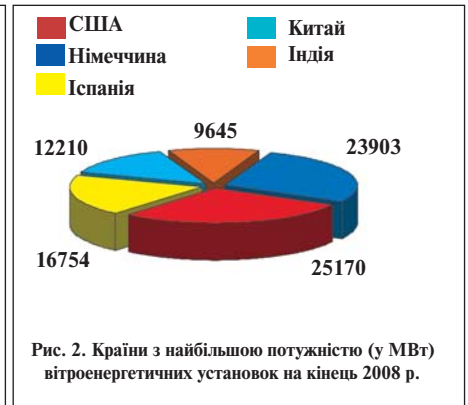
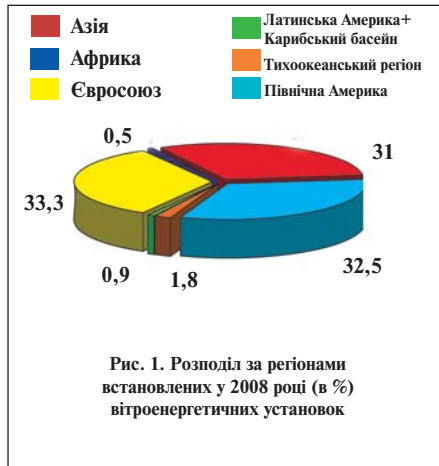
Ефективність роботи будь-якої ВЕУ визначається коефіцієнтом використання енергії вітру (коефіцієнтом потужності). Результати експериментальних досліджень свідчать, що високими значеннями коефіцієнта потужності володіють швидкохідні ГО ВЕУ пропелерного типу, а також ротори Дар'є з фіксованим і змінюваним кутот установки лопаті. І при належному аеродинамічному проектуванні вертикально-осьові ВЕУ фактично не поступаються широко розповсюдженим ГО ВЕУ пропелерного типу.

Очевидно, аеродинаміка відіграє основну роль у роботі ВЕУ. Від продуманості компонування, оптимізації форм ротора, аеродинамічних якостей поверхонь, що обертаються, залежить ефективність самої ВЕУ. Підвищення потужності ВЕУ та збільшення коефіцієнта використання енергії вітру призвели до необхідності урахування взаємного впливу лопатей, поля швидкостей навколо самого ротора і у далекому сліді вітроагрегата. Таким чином, виникла потреба у вивченні процесів формування та розпаду вихорів, а також їхнього впливу на аеродинамічні характеристики ВЕУ.

Моделі та методи розрахунку аеродинамічних характеристик вертикально-осьових вітроенергетичних установок

При проектуванні ВЕУ варто проводити комплексне дослідження аеродинамічних характеристик лопатей, траверс і ротора в цілому з урахуванням як нестационарних, так і просторових ефектів. Експериментальна аеродинаміка найчастіше оперує обмеженими обсягами даних. Крім того, натурні експерименти не завжди можливі, як із технічних, так і з економічних міркувань.

Наявні методики проектування роторів ВЕУ засновані на напівемпіричних співвідношеннях і на експериментальних даних, отриманих на авіаційних профілях. Такий підхід не дозволяє належним чином урахувати особливості обтікання роторів, крім того, він вимагає проміжних експериментальних досліджень із наступним коректуванням і уточненням розрахункової методики. Це досить дорогий і тривалий шлях еволюції технічних зразків. Цим шляхом ішов розвиток авіації, кораблебудування, турбінобудування.



Обчислювальна гідродинаміка як інструмент аеродинамічного проектування

На сьогодні обчислювальна гідродинаміка є одним зі складників процесу проектування в багатьох галузях промисловості, що зумовлено меншою вартістю чисельних експериментів порівняно з натурними. Основне завдання CFD — відтворення реальних фізичних процесів з максимальним ступенем вірогідності. За рахунок цього вдається глибше зрозуміти процеси, які відбуваються, виробити рекомендації з аеродинамічних форм проєктованого пристрою, що близькі до оптимального. Такі розрахунки дозволяють одержати докладні характеристики пристрою задовго до його виготовлення і впровадження, істотно скорочуючи витрати на дорогі продувки в аеродинамічних трубах, які присутні при стандартних методах проектування. Окремою проблемою є комп'ютерна візуалізація даних, необхідна не тільки для одержання окремих характеристик, але й для розуміння загальної картини течії.

Сучасний рівень обчислювальної гідродинаміки орієнтований на використання високопродуктивних суперкомп'ютерних систем зі швидкодією в десятки і сотні терафлоп (1 Терафлоп - 10^{12} операцій у секунду). Такі системи встановлені та експлуатуються в США, країнах Західної Європи, Япо-



Рис. 3. Вітроенергетична установка з горизонтальною (а) та вертикальною (б) віссю обертання



Рис. 4. Розрахункові схеми для роторів Дар'є (а) та Савоніуса (б)

нії, Росії. Українські вчені поки не мають таких можливостей.

Необхідність використання настільки потужної комп'ютерної техніки зумовлена тим, що переважна більшість течій, що зустрічаються на практиці, є нестационарними, тривимірними, турбулентними. Приміром, для моделювання однієї секунди польоту винищувача F-16 комп'ютеру потужністю в 1 Терафлоп потрібно близько 1000 років розрахунків. Практичне застосування обчислювальної гідродинаміки, наприклад, вибір оптимальної конфігурації пристрою, вимагає проведення багатьох параметричних досліджень при реальних строках виконання одиничного розрахунку (не більше 30-50 годин машинного часу).

В той же час, ротори ГО та ВО ВЕУ, як і ротор вертольота, пропелер літака, газові турбіни, є одними із найважливіших у плані аеродинамічного розрахунку й проектування. У загальному випадку при моделюванні обтікання роторів ВЕУ необхідно враховувати тривимірні процеси, нестационарність поля течії, в'язкі ефекти, включаючи турбулентність і її великомасштабну частину. У цей час реалізація такого повного підходу доступна лише великим дослідницьким організаціям, які використовують суперкомп'ютери або кластери персональних комп'ютерів і мають достатній рівень фінансування.

Фахівці Інституту транспортних систем і технологій НАН України "Трансмаг" накопичили досвід розробки й застосування методів обчислювальної гідродинаміки в галузі вітроенергетики. На жаль, реальні розрахунки в цей час обмежені двовимірними (плоскими) течіями. Потужності персональних комп'ютерів або невеликих кластерів (4-20 ПК) поки не дозволяють проводити дослідження обтікання тіл складної конфігурації (повні тривимірні компонування роторів ВО ВЕУ), застосовувати сучасні методи моделювання турбулентності (великомасштабна турбулентність, пряме чисельне моделювання).

Відсутність в Україні високопродуктивних комп'ютерних систем призводить до неминучого розриву між

рівнем досліджень українських та закордонних вчених в галузі обчислювальних технологій, у реальних можливостях моделювання задач промислового рівня, до залежності від імпортного програмного забезпечення.

Складність рівнянь Нав'є-Стокса

Система рівнянь Нав'є-Стокса, введена в першій половині XIX століття, дотепер є основою обчислювальної гідродинаміки. Рівняння Нав'є-Стокса, що використовують закони збереження маси, імпульсу, енергії в сполученні з основними термодинамічними й реологічними законами, містять мінімальну кількість вихідних припущень, що робить їх найповнішою й найбільш обґрунтованою системою рівнянь механіки рідини та газу. Саме рівняння Нав'є-Стокса (на відміну від рівнянь потенціалу та Ейлера) дозволяють відтворювати реальні фізичні процеси з необхідною точністю.

У той же час із математичного погляду вони становлять найскладнішу систему рівнянь математичної фізики, які застосовувались до вивчення реальних об'єктів. Для порівняння, рівняння Максвелла та Шредінгера, які становлять основу класичної електродинаміки та квантової механіки, є

простішими, що допускають аналітичні (точні) розв'язки. Для рівнянь Нав'є-Стокса ситуація зворотна, їх розв'язок можливий тільки на основі чисельного експерименту, тому що більшість течій, які трапляються на практиці, є нестационарними, тривимірними та турбулентними.

Характерною рисою зазначеної системи рівнянь є її нелінійність при наявності диференціальних доданків другого порядку з малим параметром. Хоча наявний рівень обчислювальної техніки дозволяє використовувати повну постановку початково-крайової тривимірної задачі, реалізація в індустріальних додатках такого підходу залишається занадто трудомісткою.

Проблеми моделювання турбулентності

Моделювання турбулентності при розрахунку аеродинамічних характеристик становить окрему проблему. Один із лауреатів Нобелівської премії з фізики сказав: "Коли стану перед Творцем, я задам йому два запитання: про природу квантової механіки та про природу турбулентності. Але боюся, що на друге запитання я не одержу відповіді".

Пряме чисельне моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation — DNS) є найзагальнішим підходом в обчислювальній гідродинаміці. Тут потрібне врахування динаміки виникнення й руйнування турбулентних вихорів практично на молекулярному рівні. Такий підхід є науково-дослідним в обчислювальній гідродинаміці. Він досить дорогий навіть для індустріально розвинених країн, і його впровадження в промисловість прогнозується на другу половину XXI століття.

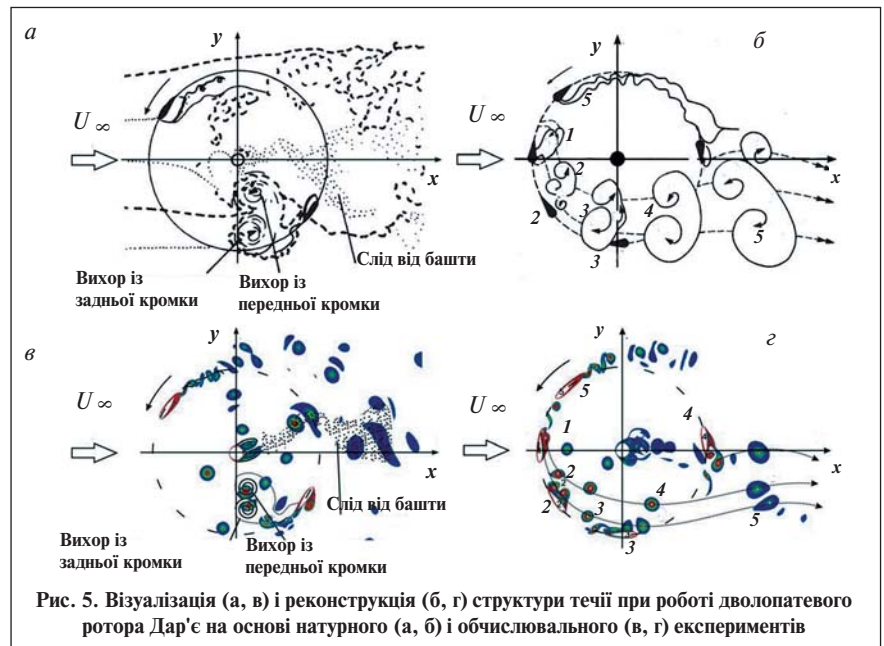


Рис. 5. Візуалізація (а, в) і реконструкція (б, г) структури течії при роботі дволопатевого ротора Дар'є на основі натурального (а, б) і обчислювального (в, г) експериментів

Існують альтернативні способи, в яких не враховуються дрібномасштабні турбулентні пульсації: метод осереднення за Рейнольдсом (RANS) і методи фільтрації (LES, DES). Ці методи вимагають додаткових співвідношень для замикання вихідної системи рівнянь Нав'є-Стокса.

У методі RANS застосовуються алгебраїчні або диференціальні моделі турбулентності. Створення моделей турбулентності — це спроби математичного опису на основі деяких теоретичних міркувань взаємодії вихорів

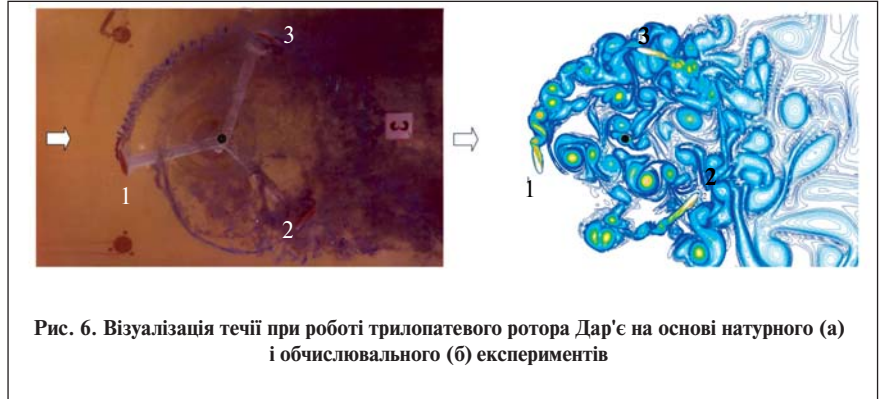


Рис. 6. Візуалізація течії при роботі трилопатевого ротора Дар'є на основі натурального (а) і обчислювального (б) експериментів

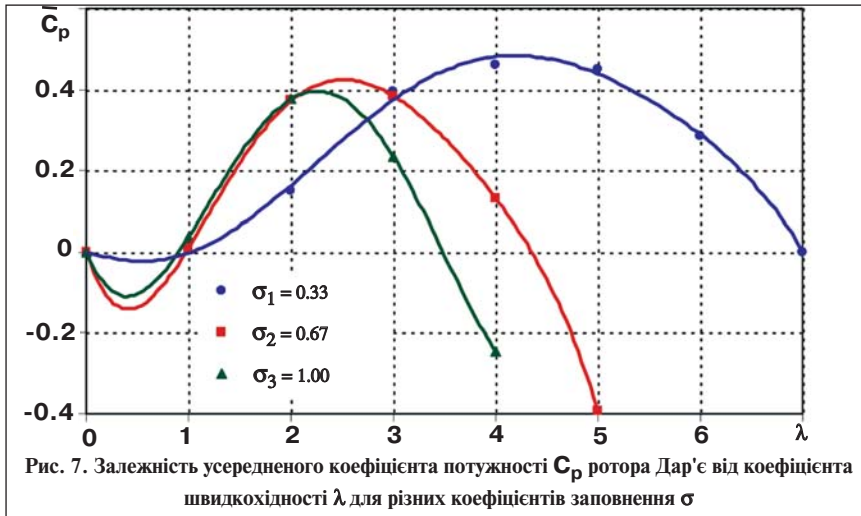


Рис. 7. Залежність усередненого коефіцієнта потужності C_p ротора Дар'є від коефіцієнта швидкохідності λ для різних коефіцієнтів заповнення σ

різного масштабу у діапазоні від Колмогорівського (порядку декількох мікронів) до великомасштабної турбулентності, порівняної з масштабами тіла. Існує кілька десятків моделей турбулентності, розроблених для різних класів течій. Універсальної моделі не існує, та й навряд чи така коли-небудь буде створена. На сьогодні розрахунки на основі RANS широко застосовуються в промисловій практиці.

Моделі LES, DES, засновані на розподілі вихорів різних масштабів, є проміжною ланкою між підходами DNS і RANS. Застосування моделей LES і DES у промислових задачах вкрай обмежене й можливе лише в досить простих геометричних областях, що в основному пов'язане з високими вимогами цих моделей до обчислювальних ресурсів. Таким чином, для практичних розрахунків у сучасних умовах рекомендується використовувати клас RANS моделей.

Пакети прикладних програм обчислювальної гідродинаміки

Сучасний етап розвитку обчислювальної гідродинаміки характеризується розробкою програмних продуктів, реалізованих у вигляді пакетів прикладних програм. Розвиток обчислювальної гідродинаміки зберігає високі темпи завдяки безперервному

вдосконалюванню елементної бази обчислювальної техніки, розширенню парку доступних для аеродинаміків-обчислювачів високопродуктивних комп'ютерів.

Сучасні пакети програм, орієнтовані на розв'язок задач обчислювальної гідродинаміки, можна розділити на три групи.

До першої групи належать науково-прикладні пакети, які розробляють у великих дослідницьких центрах США і країнах західної Європи (NASA США, ONERA Франція, DLR Німеччина, NLR-Нідерланди), а також у корпораціях Boeing, Lockheed та інших. Ці програмні засоби розвивалися протягом декількох десятиліть і призначені, у першу чергу, для розв'язку прикладних задач аерокосмічної промисловості. Вони припускають використання суперкомп'ютерів з масовою розпаралельністю обчислювальних процесів для одержання результатів у реальні строки. Крім того, як показує огляд наукової літератури, нові підходи до розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса, нові моделі турбулентності перед впровадженням у практику відпрацьовуються в рамках цих програмних засобів. На жаль, такі пакети програм є інтелектуальною власністю розроблювачів, і вони, як правило, недоступні для широкого кола дослідників.

До другої групи варто віднести комерційні CFD програми, такі як ANSYS, STAR-CD, CFX, FLUENT, FLOW-3D, ACE-U, SolidWorks CFD++ та інші. Як приклад, бюджет ANSYS на 2008 рік становив близько 250 млн. доларів. А вартість однієї ліцензійної копії пакета ANSYS — 600-800 тис. доларів. Крім того, розвиваються комерційні програми, призначені для обслуговування окремих етапів задач CFD: генерація сіток (GridGen, Chimera), візуалізації течій (TecPlot). Ці програмні засоби з'явилися наприкінці 1990-х і початку 2000-х років. Об'єктивною метою комерційних CFD програм є допомога проектувальникам, пов'язаним з розв'язком задач обчислювальної гідродинаміки, які не мають реальних можливостей для розробки власних CFD-пакетів. З погляду застосовуваних апаратних засобів, комерційні пакети призначені для експлуатації на персональних комп'ютерах або кластерах ПК. Це, у свою чергу, веде до зниження вірогідності одержуваних результатів на користь автоматизації розрахунків, що робить їх використання для розрахунку процесів обтікання ротора ВЕУ проблематичним.

Третю групу становлять CFD програми, які розроблені в університетах і невеликих науково-дослідних центрах практично у всіх розвинених країнах. Колективи співробітників звичайно невеликі (4-10 осіб учених, аспірантів, програмістів), комп'ютерна техніка різноманітна, залежна від рівня фінансування організації. Саме тут з'являються нові CFD-ідеї, нові моделі турбулентності. Хоча ці пакети поступаються пакетам першої та другої групи за універсальністю, науково-дослідні пакети можуть успішно конкурувати при розв'язку окремих, вузькоспеціалізованих задач обчислювальної гідродинаміки.

Авторами статті розроблено спеціалізований CFD-пакет, в якому досягнуто компроміс між необхідними обчислювальними ресурсами і якістю

одержуваних результатів. З одного боку, реалізовано повний підхід обчислювальної гідродинаміки на основі рівнянь Нав'є-Стокса, включаючи кілька диференціальних моделей турбулентності, а також багатоблоковий підхід для опису течій поблизу багатолопатевого ротора ВЕУ. З іншого боку, аналіз фізики обтікання ортогональних роторів Дар'є та Савоніуса дозволив звести постановку задачі у двовимірну площину (рис. 4). Це дозволило скоротити обчислювальні витрати без шкоди у вірогідності чисельного експерименту та довести розрахунок нестационарної течії до 200-300 годин на звичайному персональному комп'ютері.

Результати чисельного моделювання

На основі розробленого програмно-методичного забезпечення проведено чисельне моделювання аеродинаміки роторів Дар'є та Савоніуса із двома та трьома лопатями.

Ротор Дар'є. На рис. 5 наведено візуалізацію (а, в) і реконструкцію (б, г) структури течії при роботі дволопатевого ротора Дар'є на основі натурного (а, б) і обчислювального (в, г) експерименту. Для наочності залишено вихори максимальної інтенсивності. На рис. 5 в, крім стандартної візуалізації вихорів, додано суцільні й переривчасті лінії, а також окремі крапки для того, щоб стиль відображення розрахункових даних відповідав стилю візуалізації експериментальних даних. Виділено стадії зародження, розвитку та зриву вихорів при різних положеннях лопаті на траєкторії (рис. 5 г).

Отримано картину обтікання трилопатевого ротора Дар'є (рис. 6). Миттєва картина течії характеризується наявністю системи великих вихорів, що обертаються у протилежні сторони. При заданому коефіцієнті швидкохідності спостерігається асиметрія між різними ділянками траєкторії лопаті. Встановлено, що основний

крутильний момент створюється на навітряній ділянці траєкторії лопаті. Аналіз результатів розрахунків показав, що потік, проходячи через навітряну ділянку траєкторії лопаті, втрачає частину своєї кінетичної енергії. Саме тому коефіцієнт крутильного моменту лопаті більший на цій ділянці, ніж на підвітряній.

У цілому картина течії поблизу ротора Дар'є характеризується істотними нестационарними явищами. До них належать, передусім, динамічний зрив потоку, утворення складної системи вихорів, підвищення рівня турбулентності в затіненій області, взаємодія вихорів різних розмірів, швидкостей руху й інтенсивності з поверхнями роторів. Отримана картина течії добре узгоджується з наявними експериментальними даними. Встановлено вплив коефіцієнтів швидкохідності та заповнення на енергетичні характеристики ротора Дар'є (рис. 7).

Ротор Савоніуса. За результатами обчислювальних експериментів вдалося змоделювати нестационарне обтікання дво- та трилопатевого ротора Савоніуса турбулентним потоком повітря. Показано, що обертання ротора характеризується квазістационарним режимом обтікання. Виділено основні стадії формування вихрової структури при обертанні ротора (рис. 8). Періодичність у структурі течії навколо ротора Савоніуса спостерігається через 180° і 120° для дволопатевого та трилопатевого ротора відповідно. Візуалізація обтікання виконана за допомогою контурів завихрення. Визначено залежності коефіцієнтів крутильного моменту та потужності від коефіцієнта швидкохідності. У дволопатевого ротора значення енергетичних характеристик вище, ніж у трилопатевого. Отримані результати задовільно узгоджуються з відомими експериментальними даними.

Розроблене програмно-методичне забезпечення, яке дозволяє відтворювати реальні аеродинамічні процеси

обтікання роторів Дар'є та Савоніуса, використовується в ІТСТ НАН України та у міжнародній науково-промисловій корпорації "ВЕСТА" для розрахунку та проектування вертикально-осьових ВЕУ середнього (до 500 кВт) і малого (до 50 кВт) класів.

Результати аеродинамічного розрахунку служать вихідними даними при розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції ВО ВЕУ (роторів, опорно-поворотних вузлів, елементів трансмісії, включаючи мультиплікатори), визначення вібрацій, шумових полів, а також при проектуванні спеціалізованих електрогенераторів.

До того ж отримані параметричні залежності коефіцієнта потужності роторів Дар'є та Савоніуса від коефіцієнта швидкохідності для різних коефіцієнтів заповнення та чисел Рейнольдса використовуються для вдосконалювання наявних інженерних і напівемпіричних методик.

Висновки

Розв'язання енергетичних проблем в Україні вимагає комплексного підходу як для традиційних (нафта, газ, вугілля, ядерна енергія), так і для нетрадиційних (вітер, сонце, біопаливо) джерел енергії. Саме розв'язання, а не спекуляції навколо газового вентиля. Вітроенергетика є перспективним напрямком для створення додаткового енергетичного потенціалу України. Тому основним завданням при розв'язанні цієї проблеми повинна бути розробка нових ефективних ВЕУ з урахуванням природно-кліматичних умов України та сучасних науково-технічних досягнень.

Розвиток CFD і наявність потужних обчислювальних центрів служить одним із критеріїв, за якими країну відносять до числа розвинених. Нові комп'ютерні технології дозволяють вирішувати на сучасному рівні економічні, технологічні проблеми, зокрема й проблеми вітроенергетики.

У програмі ООН розвитку світової енергетики вказано, що в XXI сторіччі розвиненими будуть ті країни, де інтенсивно розвивається вітроенергетика. Очевидно, що розрізненими зусиллями окремих організацій неможливо вийти з наявної ситуації. Для ефективного розвитку вітроенергетики в Україні необхідно чітке сполучення державної координації зусиль та ініціативних новаторських пропозицій у різних галузях знань (аеродинаміка, міцність, електродинаміка, екологія, будівництво).

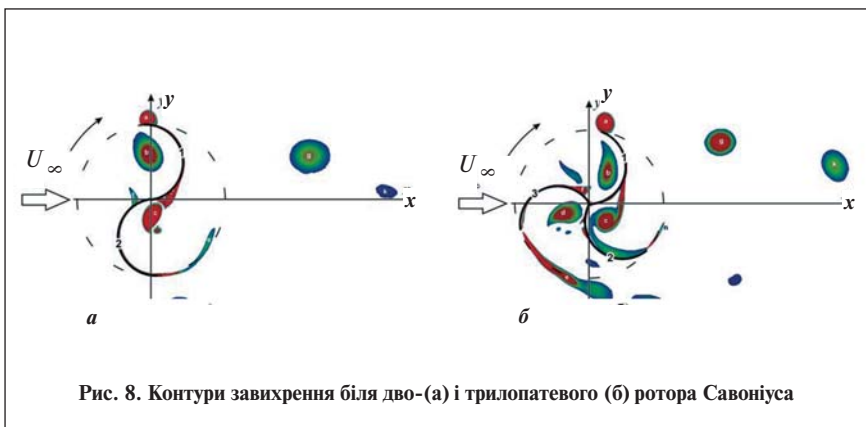


Рис. 8. Контури завихрення біля дво-(а) і трилопатевого (б) ротора Савоніуса