

2. Катан, В.А. Моделирование ударного взаимодействия тела и жидкости со свободной поверхностью [Текст] / В.А. Катан // Восточно-европ. журн. передовых технологий. Прикл. механика. – 2014. – №2/7(68). – С. 32 – 36.
3. Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н. И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707с.
4. Норкин, М.В. Смешанные задачи гидродинамического удара [Текст] / М.В. Норкин. – Ростов н/Д: Изд-во ЦВВР, 2007. – 136 с.
5. Гловински, Р. Численное исследование вариационных неравенств [Текст] / Р. Гловински, Ж.-Л. Лионс, Р. Тремольер. – М.: Мир, 1979. – 576 с.
6. Общая теория аэrodинамики больших скоростей [Текст] / под ред. У.Р. Сирса. – М.: Воениздат, 1962. – 300 с.
7. Адамар, Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа [Текст] / Ж. Адамар. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

*Надійшла до редколегії 29.09.2016*

УДК 532.516

**С.В. Тарасов<sup>1</sup>, Д. А. Редчиц<sup>1</sup>, О. Б. Полевой<sup>1</sup>,  
И. Б. Чашина<sup>1</sup>, С. В. Моисеенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут транспортних систем і технологій НАН України (г. Дніпропетровськ)

<sup>2</sup>Херсонський національний технічний університет

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА НА СЛУЖБЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Проведен обзор современного состояния и тенденций развития ветроэнергетики в мире и в Украине. Рассмотрены модели и методы расчета аэродинамических характеристик вертикально-осевых ветроэнергетических установок. Описана роль вычислительной гидродинамики в аэродинамическом проектировании сложных систем. Рассмотрены проблемы решения уравнений Навье–Стокса и моделирования турбулентности. Приведен обзор и классификация пакетов прикладных программ вычислительной гидродинамики. Обсуждены результаты численного моделирования аэродинамики роторов Дарье и Савониуса с двумя и тремя лопастями. Для численного моделирования аэродинамики роторов Дарье и Савониуса с двумя и тремя лопастями применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса. При моделировании турбулентности используются однопараметрические дифференциальные модели турбулентности. Решение системы исходных уравнений получено с помощью неявного конечно-объемного численного алгоритма, базирующегося на методе искусственной сжимаемости и многоблочных вычислительных технологиях. Представлены результаты расчета роторов Дарье и Савониуса с различным количеством и геометрическими характеристиками лопастей. Выполнен анализ поля течения вокруг роторов. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры. Установлено влияние числа Рейнольдса, коэффициентов быстроходности и заполнения на энергетические характеристики роторов Дарье и Савониуса.

**Ключевые слова:** численные методы, ветроагрегат, ротор Дарье, ротор Савониуса, уравнения Навье–Стокса, модель турбулентности.

Проведено огляд сучасного стану та тенденцій розвитку вітроенергетики у світі і в Україні. Розглянуто моделі та методи розрахунку аеродинамічних характеристик вертикально-осьових вітроенергетичних установок. Описано роль обчислювальної гідродинаміки в аеродинамічному проектуванні складних систем. Розглянуто проблеми розв'язання рівнянь

---

© Тарасов С.В., Редчиц Д. А., Полевой О. Б., Чашина И. Б., Моисеенко С. В., 2016

Нав'є–Стокса і моделювання турбулентності. Наведено огляд і класифікацію пакетів прикладних програм обчислювальної гідродинаміки. Обговорюються результати числового моделювання аеродинаміки роторів Дар'є і Савоніуса з двома і трьома лопатями. Для числового моделювання аеродинаміки роторів Дар'є і Савоніуса з двома і трьома лопатями застосовуються осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є–Стокса. Під час моделювання турбулентності застосовуються однопараметричні диференціальні моделі турбулентності. Розв'язок системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного скінченно-об'ємного числового алгоритму, що ґрунтуються на методі штучної стисливості і багатоблокових обчислювальних технологіях. Наведено результати розрахунку роторів Дар'є і Савоніуса з різною кількістю і геометричними характеристиками лопатей. Виконано аналіз поля течії навколо роторів. Виділено основні стадії формування вихрової структури. Встановлено вплив числа Рейнольдса, коефіцієнтів швидкохідності та заповнення на енергетичні характеристики роторів Дар'є і Савоніуса.

**Ключові слова:** числові методи, вітроагрегат, ротор Дар'є, ротор Савоніуса, рівняння Нав'є–Стокса, модель турбулентності.

A review of the current state and tendencies of development of wind power in the world and in Ukraine was carried out. The models and methods for calculating the aerodynamic characteristics of vertical-axis wind turbines were considered. The role of computational fluid dynamics in the aerodynamic design of complex systems was described. The problems of solving of Navier–Stokes equations and turbulence modeling were considered. A review and classification of applied programs packages of computational fluid dynamics was carried out. The results of numerical simulation of aerodynamics of Darrieus and Savonius rotors with two and three blades are discussed. The Reynolds averaged Navier–Stokes equation was applied to a numerical simulation of aerodynamics of Darrieus and Savonius rotors with two and three blades. The one-equation turbulence models were used. The solution of a system of initial equations is obtained with the help of implicit finite-volume numerical algorithm which was based on the artificial compressibility method. In multidomain areas overlapped structured grids were applied. The results of calculation of Darrieus and Savonius rotors with different quantity and geometrical performances of blades are submitted. The analysis of flow field near rotors was carried out. The main stages of development of vortex were allocated. The influence of Reynolds numbers, tip-speed-ratios and solidity on power characteristics of Darrieus and Savonius rotors was found.

**Key words:** numerical methods, wind turbine, Darrieus rotor, Savonius rotor, Navier–Stokes equations, turbulence model.

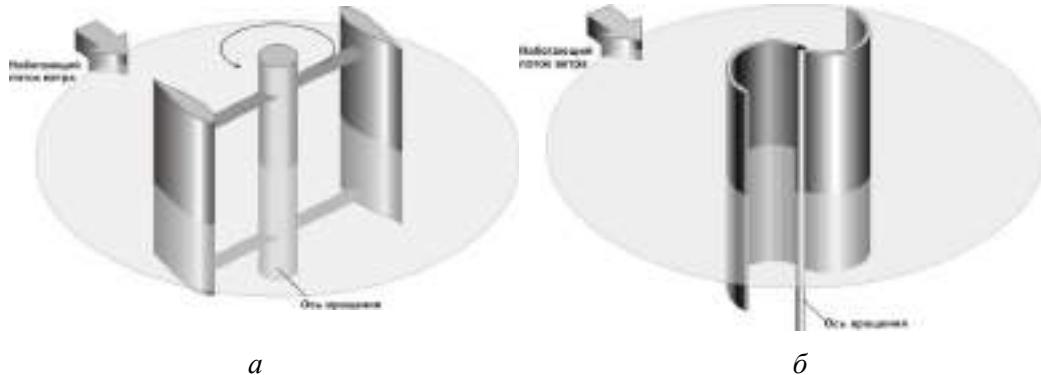
**Современное состояние и тенденции развития ветроэнергетики в мире и в Украине.** Экономика Украины существенно зависит от внешних поставок энергоносителей. Для развития ядерной энергетики после Чернобыля необходимо создание атомных энергетических станций (АЭС) нового поколения, отвечающих повышенным требованиям эффективности, безопасности и экологичности, что требует международного сотрудничества.

К одному из перспективных направлений решения энергетической безопасности Украины относится ветроэнергетика. В ближайшее десятилетие ветроэнергетика может стать источником наиболее дешевой электроэнергии, вырабатываемой в промышленных масштабах.

По оценкам Всемирного совета по ветроэнергетике (Global Wind Energy Council – GWEC) к 2015 году во всем мире было установлено около 369597 МВт ветроэлектрогенерирующих мощностей. Евросоюз доминирует на мировом рынке ветроэнергетики по количеству введенных в строй в 2014 году ветроэнергетических установок (ВЭУ) 12858 МВт. Лидерами на мировом рынке являются США, Германия, Испания. Доля Украины составляет тринадцать сотых процента (498 МВт) от мирового объема по номинально заявленным мощностям. Реально работающих мощностей еще меньше.

В зависимости от ориентации оси вращения по отношению к направлению потока ветра ветроэнергетические установки (ВЭУ) можно разделить на два

основных класса: горизонтально-осевые (ГО) и вертикально-осевые (ВО). Горизонтально-осевой называется установка, ось вращения которой совпадает с направлением потока ветра. У вертикально-осевых ВЭУ ось перпендикулярна потоку. Наиболее широко распространенными представителями данного класса являются роторы Дарье и Савониуса (рис. 1).



**Рис. 1. Расчетные схемы для роторов:** а – Дарье; б – Савониуса

В настоящее время основу ветроэнергетики составляют ГО ВЭУ. На их долю приходится порядка 85 % вырабатываемой электроэнергии. Основным фактором широкого распространения ГО ВЭУ является хорошее понимание их аэродинамики. Это обратная пропеллерная задача, хорошо отработанная с начала XX века. В то же время лопасть ГО ВЭУ имеет сложный профиль, что приводит к дорогой технологии их производства. ГО ВЭУ эксплуатируются при достаточно больших скоростях ветра, порядка 10-15 м/с. Зарубежный опыт показывает, что при скоростях ветра  $U < 5$  м/с их эксплуатация становится нерентабельной.

На Украине существует всего два региона, которые удовлетворяют условиям эксплуатации ГО ВЭУ – Карпаты и Юг Украины (Приазовье и Причерноморье). Общий энергетический ветровой потенциал в Украине – умеренный. Поэтому нельзя механически переносить зарубежные разработки на территорию Украины. Это может привести к коммерчески провальным проектам. Отрицательный опыт в этом отношении уже имеется. Здесь нужны рациональные технические решения!

На наш взгляд, альтернативой для Украины являются вертикально-осевые ВЭУ. К преимуществам ВО ВЭУ можно отнести: низкий порог рабочей скорости ветра, отсутствие механизма ориентации на ветер, меньший уровень эксплуатационных расходов, простота формы лопасти, пониженный уровень шума. По нашим оценкам реально создание недорогих и надежных ВО ВЭУ, работающих в рамках умеренного ветропотенциала Украины. Одна из основных проблем – недостаточный уровень понимания аэродинамических процессов ВО ВЭУ из-за малой изученности.

Эффективность работы любой ВЭУ определяется коэффициентом использования энергии ветра (коэффициентом мощности). Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что высокими значениями коэффициента мощности обладают быстроходные ГО ВЭУ пропеллерного типа, а также роторы Дарье с фиксированным и изменяемым углом установки лопасти. И при хорошем аэродинамическом проектировании вертикально-осевые ВЭУ фактически не уступают широкораспространенным ГО ВЭУ пропеллерного типа.

Очевидно, аэродинамика играет основную роль в работе ВЭУ. От продуманности компоновки, оптимизации форм ротора, аэродинамических качеств вращающихся поверхностей зависит конечная эффективность самой ВЭУ. Повышение мощности ВЭУ и увеличение коэффициента использования энергии ветра привели к необходимости учета взаимного влияния лопастей друг на друга, поля скоростей вокруг самого ротора и в дальнем следе ветроагрегата. Таким образом, возникла потребность в изучении процессов формирования и распада вихрей, а также их влияния на аэродинамические характеристики ВЭУ.

**Модели и методы расчета аэродинамических характеристик вертикально-осевых ветроэнергетических установок.** При проектировании ВЭУ следует проводить комплексное исследование аэродинамических характеристик лопастей, траверс и ротора в целом с учетом как нестационарных, так и пространственных эффектов. Экспериментальная аэродинамика зачастую оперирует ограниченными объемами данных. Кроме того, натурные эксперименты не всегда возможны, как по техническим, так и экономическим соображениям.

Существующие методики проектирования роторов ВЭУ основаны на полуэмпирических соотношениях и на экспериментальных данных по авиационным профилям. Такой подход не позволяет должным образом учесть все особенности обтекания роторов, кроме того, требует промежуточных экспериментальных исследований с последующей корректировкой и уточнением расчетной методики. Это весьма дорогостоящий и длительный путь эволюции технических образцов. По этому пути шло развитие авиации, кораблестроения, турбиностроения.

Главными трудностями в расчете нестационарных процессов при обтекании роторов ВО ВЭУ являются эффекты динамического срыва потока. До настоящего времени ни одна из известных упрощенных методик не давала возможности адекватно рассчитать аэродинамические характеристики роторов в этом случае.

Современные тенденции в проектировании сложной техники связаны с применением полных математических моделей механики жидкости и газа, основанных на самых общих физических законах (сохранение массы, импульса, энергии), реологических соотношениях, динамике турбулентных вихрей. Такие модели являются, с математической точки зрения, сложными системами нелинейных дифференциальных уравнений, для решения которых требуется использование мощных вычислительных комплексов. Для создания таких моделей используется практически весь аппарат высшей математики – аналитическая и дифференциальная геометрия, математический анализ, тензорное исчисление, теория уравнений математической физики. Решение таких систем создает качественно новый уровень проектирования – проведение численных экспериментов, полностью воспроизводящих условия натурных экспериментов. Такой подход является основой сравнительно молодой науки – вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD).

**Вычислительная гидродинамика как инструмент аэродинамического проектирования.** На сегодняшний день вычислительная гидродинамика является одной из составляющих процесса проектирования во многих отраслях промышленности, что обусловлено меньшей стоимостью численных экспериментов по сравнению с натуральными. Основная задача CFD – воспроизведение реальных физических процессов с максимальной степенью достоверности. За счет этого удается глубже понять происходящие процессы,

выработать рекомендации по аэродинамическим формам проектируемого устройства, близким к оптимальным. Подобные расчеты позволяют получить подробные характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения, существенно сокращая затраты на дорогостоящие продувки в аэродинамических трубах (эти продувки включены в стандартные методы проектирования как обязательная составляющая). Отдельной проблемой является компьютерная визуализация получаемого решения, необходимая не только для получения отдельных характеристик, но и для понимания общей картины течения.

Современный уровень вычислительной гидродинамики ориентирован на использование высокопроизводительных суперкомпьютерных систем с быстродействием в десятки и сотни терафлоп ( $1 \text{ Терафлоп} = 10^{12} \text{ операций в секунду}$ ). Такие системы применяются в США, Франции, Германии, Японии, России, Китае.

В то же время роторы ГО и ВО ВЭУ, как и ротор вертолета, пропеллер самолета, газовые турбины, являются одними из самых трудных в плане аэродинамического расчета и проектирования. В общем случае при моделировании обтекания роторов ВЭУ необходим учет трехмерных процессов, нестационарности поля течения, вязких эффектов, включая турбулентность и ее крупномасштабную часть. В настоящее время реализация такого полного подхода доступна лишь крупным исследовательским организациям, использующим суперкомпьютеры или кластеры персональных компьютеров и имеющим достаточный уровень финансирования.

Специалисты Института транспортных систем и технологий НАН Украины накопили большой опыт разработки и применения методов вычислительной гидродинамики в области ветроэнергетики. К сожалению, реальные расчеты в настоящее время ограничены двумерными (плоскими) течениями. Мощности персональных компьютеров или небольших кластеров (4-20 ПК) пока не позволяют проводить исследования обтекания тел сложной конфигурации (полные трехмерные компоновки роторов ВО ВЭУ), применять современные методы моделирования турбулентности (крупномасштабная турбулентность, прямое численное моделирование).

Отсутствие в Украине высокопроизводительных компьютерных систем приводит к неизбежному разрыву между украинскими и зарубежными учеными в области вычислительных технологий, в реальных возможностях моделирования задач промышленного уровня, к зависимости от импортного программного обеспечения.

**Сложность уравнений Навье–Стокса.** Система уравнений Навье–Стокса, выведенная в первой половине XIX века, до сих пор является основой вычислительной гидродинамики. Уравнения Навье–Стокса, использующие законы сохранения массы, импульса, энергии в сочетании с основными термодинамическими и реологическими законами, содержат минимальное количество исходных предположений, что делает их наиболее полной и обоснованной системой уравнений механики жидкости и газа. Именно уравнения Навье–Стокса (в отличие от уравнений потенциала и Эйлера) позволяют воспроизводить реальные физические процессы с необходимой точностью.

В то же время с математической точки зрения они составляют самую сложную систему уравнений математической физики, применяемых к изучению реальных объектов. Для сравнения, более простые уравнения Максвелла и Шрёдингера,

составляющие основу классической электродинамики и квантовой механики, допускают аналитические (точные) решения. Для уравнений Навье–Стокса ситуация обратная, их решение возможно только на основе численного эксперимента, потому что большинство встречающихся на практике течений являются нестационарными, трехмерными и турбулентными.

Характерной особенностью указанной системы уравнений является ее нелинейность при наличии дифференциальных слагаемых второго порядка с малым параметром. Хотя существующий уровень вычислительной техники позволяет использовать полную постановку начально-краевой трехмерной задачи, реализация в индустриальных приложениях такого подхода остается слишком трудоемкой.

**Проблемы моделирования турбулентности.** Моделирование турбулентности при расчете аэродинамических характеристик составляет отдельную проблему. Один из лауреатов Нобелевской премии по физике сказал: «Когда предстану перед Создателем, я задам ему два вопроса: о природе квантовой механики и о природе турбулентности. Но боюсь, что на второй вопрос я не получу ответа».

Прямое численное моделирование турбулентности (Direct Numerical Simulation – DNS) является самым общим подходом в вычислительной гидродинамике. Здесь требуется учет динамики возникновения и разрушения турбулентных вихрей практически на молекулярном уровне. Такой подход является научно-исследовательским в вычислительной гидродинамике. Он весьма дорогостоящий даже для индустриально развитых стран и его внедрение в промышленность прогнозируется на вторую половину XXI века.

Существуют альтернативные способы, в которых не учитываются мелкомасштабные турбулентные пульсации: метод осреднения по Рейнольдсу (RANS) и методы фильтрации (LES, DES). Эти методы требуют дополнительных соотношений для замыкания исходной системы уравнений Навье–Стокса.

В методе RANS применяются алгебраические или дифференциальные модели турбулентности. Создание моделей турбулентности – это попытки математического описания на основе некоторых теоретических соображений взаимодействия вихрей разного масштаба в диапазоне от Колмогоровского (порядка нескольких микрон) до крупномасштабной турбулентности, сравнимой с масштабами обтекаемого тела. Существует несколько десятков моделей турбулентности, разработанных для разных классов течений. Универсальной модели не существует и вряд ли такая когда-нибудь будет создана. На сегодняшний момент расчеты на основе RANS широко применяются в промышленной практике.

Модели LES, DES, основанные на разделении вихрей различных масштабов, являются промежуточным звеном между подходами DNS и RANS. Применение моделей LES и DES в промышленных задачах крайне ограничено и возможно лишь в достаточно простых геометрических областях, что в основном связано с высокими требованиями данных моделей к вычислительным ресурсам. Таким образом, для практических расчетов в современных условиях рекомендуется использовать класс RANS моделей.

**Пакеты прикладных программ вычислительной гидродинамики.** Современный этап развития вычислительной гидродинамики характеризуется разработкой программных продуктов, реализованных в виде пакетов прикладных программ. Развитие вычислительной гидродинамики сохраняет высокие темпы благодаря непрерывному совершенствованию элементной базы вычислительной

техники, расширению парка доступной для аэродинамиков-вычислителей высокопроизводительных компьютеров.

Несмотря на наличие многочисленных коммерческих пакетов по вычислительной аэродинамике ANSYS, FLUENT, CFX, CFD-Star, SolidWorks, использование их для расчета процессов обтекания ротора ветроагрегата представляется проблематичным.

Во-первых, широкая направленность (универсальность) может привести к недостаточно адекватному учету специфических аспектов ВО ВЭУ: аэродинамика подвижных поверхностей, сложность геометрической области (для ротора Дарье – многосвязность, для Савониуса – сложность угловых конфигураций).

Во-вторых, основные коммерческие пакеты программ базируются на методологической базе вычислительной аэрогидродинамики и персональных компьютерах, разработанных в середине 90-х годов. Это проявляется в использовании ряда упрощенных подходов и методик. Например, для описания турбулентных явлений зачастую применяются пристеночные функции, априорно предполагающие определенную структуру течения, что не подходит для ВО ВЭУ. Использование упрощенных подходов проявляется также в недостаточной разрешающей способности расчетных сеток.

В-третьих, коммерческие пакеты рекламируют свои широкие возможности, однако, судя по обзору литературы, эти возможности недостаточно верифицированы. Нет достаточной уверенности в работоспособности того или иного пакета при определенном сочетании исходных параметров задачи, наличии сложных нестационарных явлений, таких как динамический срыв потока.

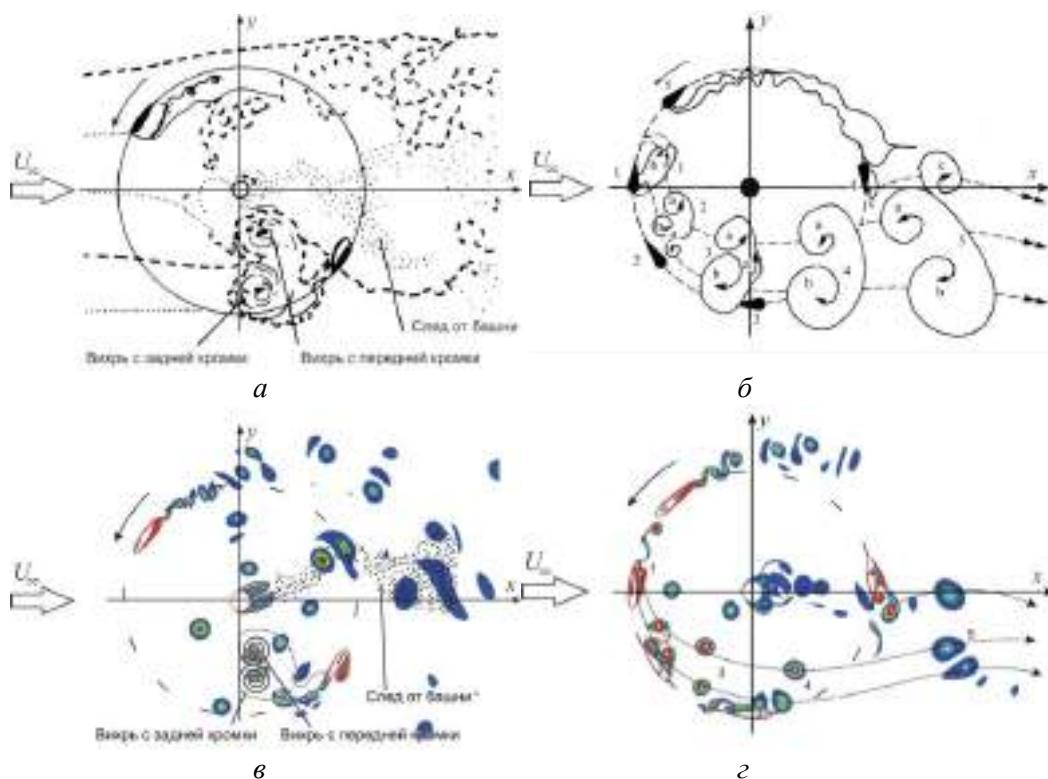
В-четвертых, в коммерческих пакетах крайне тяжело найти оптимальное сочетание численных методов, геометрии и топологии сетки при максимальном разрешении, чтобы получить достоверные и надежные данные с качественной и количественной стороны.

Кроме того, не последнюю роль играют правовая и финансовая стороны использования коммерческих CFD пакетов.

Авторами статьи разработан специализированный CFD пакет, в котором достигнут компромисс между требуемыми вычислительными ресурсами и качеством получаемых результатов. С одной стороны, реализован полный подход вычислительной гидродинамики на основе уравнений Навье–Стокса [1–3;6], включая несколько дифференциальных моделей турбулентности [4;5], а также многоблочный подход для описания течений вблизи вращающегося многолопастного ротора ВЭУ. С другой стороны, анализ физики обтекания ортогональных роторов Дарье и Савониуса дал возможность свести постановку задачи в двумерную плоскость, что позволило сократить вычислительные затраты без ущерба в достоверности численного эксперимента и довести расчет нестационарного течения до 200–300 часов на обычном персональном компьютере.

**Результаты численного моделирования.** На основе разработанного программно-методического обеспечения проведено численное моделирование аэродинамики роторов Дарье и Савониуса с двумя и тремя лопастями.

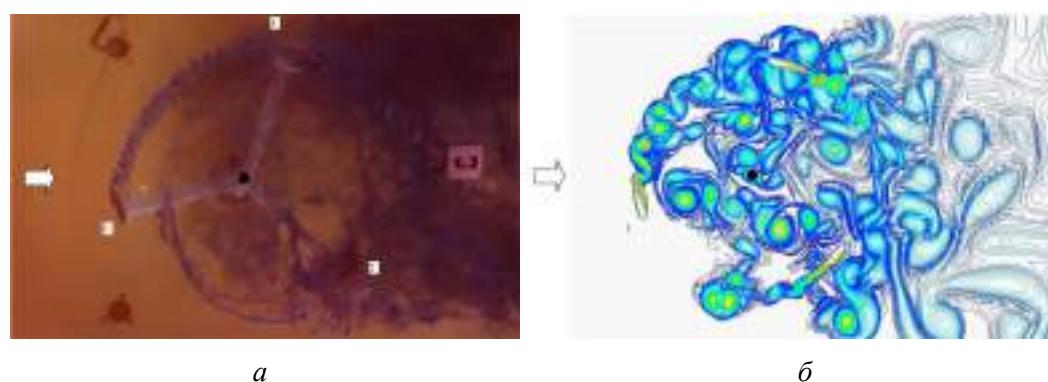
*Ротор Дарье.* На рис. 2 приведена визуализация и реконструкция структуры течения при работе двухлопастного ротора Дарье на основе натурного и вычислительного экспериментов.



**Рис. 2. Структура течения при работе двухлопастного ротора Дарье:**  
 а, в – визуализация структуры течения; б, г – реконструкция структуры течения;  
 а, б – натурный эксперимент; в, г – вычислительный эксперимент

Для наглядности оставлены вихри максимальной интенсивности. На рис. 2, в, кроме стандартной визуализации вихрей, добавлены сплошные и прерывистые линии, а также отдельные точки для того, чтобы стиль интерпретации расчетных данных соответствовал стилю визуализации экспериментальных данных. Выделены стадии зарождения, развития и срыва вихрей при различных положениях лопасти на траектории (рис. 2, г).

Получена картина обтекания трехлопастного ротора Дарье (рис. 3).



**Рис. 3. Визуализация течения при работе трехлопастного ротора Дарье на основе экспериментов:** а – натурный эксперимент; б – вычислительный эксперимент

Мгновенная картина течения характеризуется наличием системы крупных вихрей, которые врачаются в противоположные стороны. При заданном коэффициенте быстроходности наблюдается асимметрия между различными участками траектории лопасти. Установлено, что основной крутящий момент создается на наветренном участке траектории лопасти. Анализ результатов расчетов показал, что поток, проходя через наветренный участок траектории лопасти, теряет часть своей кинетической энергии. Именно поэтому коэффициент крутящего момента лопасти больший на этом участке, чем на подветренном.

В целом картина течения вблизи ротора Дарье характеризуется существенными нестационарными явлениями. К ним относятся, в первую очередь, динамический срыв потока, образование сложной системы вихрей, повышение уровня турбулентности в затененной области, взаимодействие вихрей различных размеров, скоростей движения и интенсивности с поверхностями роторов. Полученная картина течения хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Установлено влияние коэффициентов быстроходности и заполнения на энергетические характеристики ротора Дарье (рис. 4).

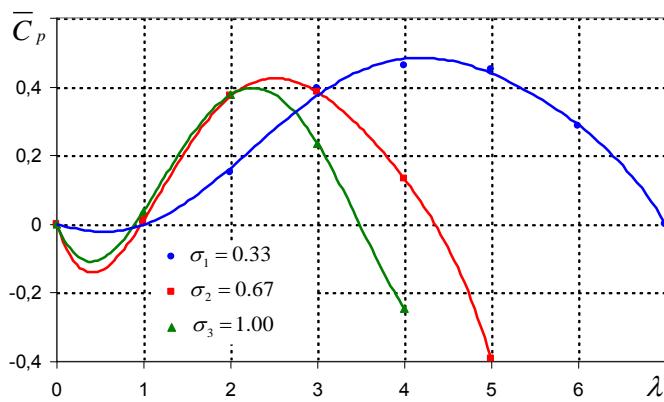


Рис. 4. Зависимость осредненного коэффициента мощности  $\bar{C}_p$  ротора Дарье от коэффициента быстроходности  $\lambda$  для различных коэффициентов заполнения  $\sigma$

*Ротор Савониуса.* В результате вычислительных экспериментов удалось смоделировать нестационарное обтекание двух- и трехлопастного роторов Савониуса турбулентным потоком воздуха. Показано, что вращение ротора характеризуется квазистационарным режимом обтекания. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры при вращении ротора (рис. 5).

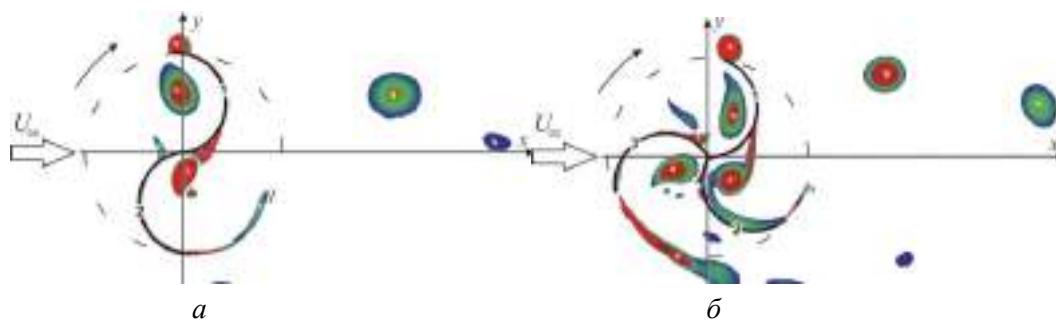


Рис. 5. Контуры завихренности возле ротора Савониуса:  
а – двухлопастного; б – трехлопастного

Периодичность в структуре течения вокруг ротора Савониуса наблюдается через  $180^\circ$  и  $120^\circ$  для двухлопастного и трехлопастного роторов соответственно. Визуализация обтекания выполнена с помощью контуров завихренности. Определены зависимости коэффициентов крутящего момента и мощности от коэффициента быстроходности. У двухлопастного ротора значения энергетических характеристик выше, чем у трехлопастного. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

Разработанное программно-методическое обеспечение позволяет воспроизводить реальные аэродинамические процессы обтекания роторов Дарье и Савониуса, используется в ИТСТ НАН Украины и в МНПК «ВЕСТА» для расчета и проектирования вертикально-осевых ВЭУ среднего (до 500 кВт) и малого (до 50 кВт) классов.

Результаты аэродинамического расчета служат исходными данными при расчете напряженно-деформированного состояния элементов конструкции ВО ВЭУ (роторов, опорно-поворотных узлов, элементов трансмиссии, включая мультипликаторы и т.д.), определении вибраций, шумовых полей, а также при проектировании специализированных электрогенераторов.

К тому же полученные параметрические зависимости коэффициента мощности роторов Дарье и Савониуса от коэффициента быстроходности для различных коэффициентов заполнения и чисел Рейнольдса используются для совершенствования существующих инженерных и полуэмпирических методик.

**Заключение.** Решение энергетических проблем в Украине требует комплексного подхода как для традиционных (нефть, газ), так и для нетрадиционных (ветер, солнце, биотопливо) источников энергии. Именно решение, а не спекуляции вокруг газового вентиля. Ветроэнергетика является перспективным направлением для создания дополнительного энергетического потенциала Украины. Поэтому основной задачей при решении данной проблемы должна быть разработка новых экономически эффективных ВЭУ с учетом природно-климатических условий Украины и современных научно-технических достижений.

Развитие CFD и наличие мощных вычислительных центров служат одним из критериев, по которым страна относится к числу развитых. Новые компьютерные технологии позволяют решать на современном уровне экономические, технологические проблемы, в том числе и проблемы ветроэнергетики.

В программе ООН развития мировой энергетики сказано, что *в XXI столетии развитыми будут те страны, где интенсивно развивается ветроэнергетика*. Очевидно, что разрозненными усилиями отдельных организаций невозможно выйти из сложившейся ситуации. Для эффективного развития ветроэнергетики в Украине необходимо четкое сочетание государственной координации усилий и инициативных новаторских предложений в различных отраслях знаний (аэродинамика, прочность, электродинамика, экология, строительство).

### **Библиографические ссылки**

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст]/ Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
2. Roe, P.L. Approximate riemann schemes [Text]/ P.L. Roe // J. of Computational Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357–372.

3. Rogers, S.E. Comparison of implicit schemes for the incompressible Navier–Stokes equations and artificial compressibility [Text]/ S.E. Rogers // AIAA J. – 1995. – Vol.33, № 11. – P. 2066–2072.
4. Restatement of the Spalart–Allmaras eddy–viscosity model in strain–adaptive formulation [Text]/ T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA J. – 2003. – Vol.4, № 7. – P.1396–1399.
5. Spalart, P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow [Text]/ P.R. Spalart, S.R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – P. 21.
6. Whitfield, D.L. Numerical solution of the two-dimensional time-dependent incompressible Euler equations [Text]/ D.L. Whitfield, L.K. Taylor // Mississippi state university NACA-CR-195775. – 1994. – P. 65.

Надійшла до редколегії 12.04.2016

УДК 532.546:533.15

**В.О.Сясеv, I.B.Селезньова, O.I.Губіn, H.B.Селезньова**

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **ПРОНИКНЕННЯ ГАЗУ КРІЗЬ ПОРИСТИЙ МАТЕРІАЛ ЗА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ**

Статтю присвячено дослідження газопроникності пористих твердих матеріалів. Продемонстровано, що актуальність цього питання обумовлена тим, що багато агрегатів у сучасних умовах функціонують в агресивних середовищах зі значним перепадом тиску, тому необхідно певним чином захистити основний матеріал конструкції. Показано, що для захисту основного матеріалу від дії агресивного середовища його покривають шаром легкого твердого неметалевого матеріалу, який є пористий, при цьому такий захисний шар повинен відповісти визначенням вимогам із газопроникності. Доведено, що експериментальне дослідження газопроникності достить трудомісткє і дороге, тому необхідне теоретичне вивчення цього процесу. Розглянуто задачу проникнення газу крізь пористу тверду стінку із заданими фізичними властивостями, який проникає із одного обмеженого об'єму в інший за зміни перепаду тиску. Задачу розв'язано в безрозмірному вигляді із застосуванням методів скінчених різниць і прогонки. Розроблено алгоритм розрахунку задачі і його програмну реалізацію на мові програмування Delphi. Результати розрахунку наведено у вигляді графіків залежності тиску від часу та координати за товщиною пористої стінки, а також графіків залежності витрат газу від часу.

**Ключові слова:** пористість, проникнення, газопроникність, рівняння напорної фільтрації, пористе середовище.

Статья посвящена исследованию газопроницаемости пористых твердых материалов. Продемонстрировано, что актуальность этого вопроса обусловлена тем, что многие агрегаты в современных условиях функционируют в агрессивных средах с высоким перепадом давления, поэтому необходимо определенным образом защитить основной материал конструкции. Показано, что для защиты основного материала от действия агрессивной среды его покрывают слоем легкого твердого неметаллического материала, представляющего собой пористую среду, и при этом такой защитный слой должен соответствовать определенным требованиям по газопроницаемости. Продемонстрировано, что экспериментальное исследование газопроницаемости достаточно трудозатратное и дорогостоящее, поэтому необходимо теоретическое изучение этого процесса. Рассмотрена задача проникновения газа через пористую твердую стенку с заданными физическими свойствами, который проникает из одной емкости в другую при изменении перепада давления. Задача решена в безразмерном виде с применением методов конечных разностей и прогонки. Разработан алгоритм расчета задачи и его программная реализация на языке программирования Delphi. Результаты расчета представлены в виде графиков зависимости давления от времени и координаты по толщине пористой стенки, а также графиков зависимости расхода газа от времени.

**Ключевые слова:** пористость, проникновение, газопроницаемость, уравнение напорной фильтрации, пористая среда.