

## Моделирование течения в ВЭУ NREL с использованием пакета программ FlowVision

Одним из экологически чистых источников энергии является энергия ветра. В этой связи ветровые энергетические установки (ВЭУ), преобразующие энергию ветра в электрическую энергию, находят все более широкое применение в различных регионах нашей планеты. Быстрое развитие возможностей вычислительной техники и численных методов последнего времени позволяют рассматривать средства трехмерного моделирования в качестве неотъемлемого инструмента для проектирования и анализа различных технических изделий. В частности, при проектировании ветровых энергетических установок самым активным образом используются пакеты программ аэродинамического моделирования.

Безусловно, одним из строгих требований к таким программам является высокая точность моделирования. На рубеже веков в лаборатории Эймсовского центра НАСА (Ames, NASA) были проведены многопараметрические натурные испытания ветроэнергетической установки, имеющей десятиметровый диаметр ротора и производящей номинальную мощность около 20 кВт (рис. 1). Одной из целей испытаний являлось получение достоверных данных для верификации вычислительных программ. Результатом “слепого” сравнения различных программ, организованного NREL непосредственно после проведения самого эксперимента, является вывод



Рис. 1. Общий вид ротора экспериментальной установки

о невысокой точности подавляющего большинства принявших участие в испытании программ.

В сравнении результатов приняли участие 18 организаций (12 европейских) в общей сложности с девятнадцатью вычислительными программами. “Слепое” сравнение предполагало предоставление участникам со стороны организаторов геометрии установки и условий эксперимента, в ответ – участники делились с организаторами расчетными результатами, полученными при отсутствии информации о результатах проведенного эксперимента. Разумеется, публикация сравнительных данных исключает указания соответствия названий программ и результатов.

Экспериментальные исследования ветроэнергетической установки, проведенные в NREL, охватывают широкий диапазон условий работы изделия. Полученный в ходе эксперимента обширнейший экспериментальный материал можно обоснованно отнести к экспериментальным данным, служащим основой для верификации вычислительных программ.

В данной публикации описываются результаты исследования возможностей пакета программ FlowVision при моделировании аэродинамики ветроэнергетических установок, инициированного одним из авторов (Cloud Yu). Этим же автором была осуществлена работа по обеспечению расчетов экспериментальными данными. В свете выпуска в 2014 году новой версии программы 3.09 задача приобрела еще и дополнительный демонстрационный оттенок. Указанные факторы явились основанием для проведения достаточно многочисленных расчетов, включая ресурсоемкие расчеты на кластере МГУ “Ломоносов”.

В исследовании для аэродинамического расчета ВЭУ NREL был использован многофункциональный программный комплекс FlowVision, разрабатываемый одноименным подразделением компании ТЕСИС. Для расчетов использовались различные версии программы (3.08 и 3.09). Новая версия 3.09 включает в себя ряд нововведений, выгодно отличающих ее от предшествующей. Так, например, реализованы новые типы граничных условий – скользящие поверхности и периодические границы. Скользящие поверхности позволяют соединять в одну

область вращающиеся и неподвижные подобласти и проводить их одновременный расчет в рамках единого алгоритма. Включение периодичности в граничные условия дает возможность замены области с одинаковыми по геометрии подобластями и физическими процессами в них на одну подобласть, а также позволяет выполнять расчет, соответственно, только для одной подобласти. Также внедрена возможность задания приповерхностной перекрывающей сетки, позволяющей более точно моделировать течения в пограничном слое. В расчетах по версии программы FlowVision-3.09 применялись периодические граничные условия, вычисления были проведены как с приповерхностной сеткой, так и без нее. Результаты с приповерхностной сеткой в данной статье не приводятся.

## Расчетная область

Расчетная область рассматривалась в трех конфигурациях. Цилиндрическая область, показанная на рис. 2а, была использована для моделирования течений по программе FlowVision-3.08 с применением сеток большой размерности (7-8 млн и 24-25 млн ячеек), несвойственной для ординарных расчетов. Расчеты на упомянутых сетках в основном были нацелены на исследование поведения решения при измельчении сетки. Постановка задачи предполагает вращение всей вычислительной области синхронно вместе с ротором ВЭУ.

Область на рис. 2б была использована лишь в одном расчете для подтверждения работоспособности технологии скользящих поверхностей, реализованной в версии FlowVision-3.09. В этой конфигурации вместе с ротором вращается выделенная цилиндрическая подобласть, а оставшаяся часть области остается неподвижной.

Область с периодическими граничными условиями показана на рис. 2с. Применение периодичности позволяет рассмотреть лишь половину всей расчетной области, что вдвое сокращает временные затраты для решения задачи. Для области в такой конфигурации был подобран минимально возможный размер сетки, достаточный для получения удовлетворительных для инженерной практики решений. Оказалось, что размер такой сетки не превышает 1,5 млн ячеек. Расчет одного варианта на сетке 1,4 млн ячеек занимает около 1-2 суток физического времени на персональном компьютере с одним 4-х ядерным процессором с частотой 3,6 ГГц и требует 5,3 ГБ оперативной памяти.

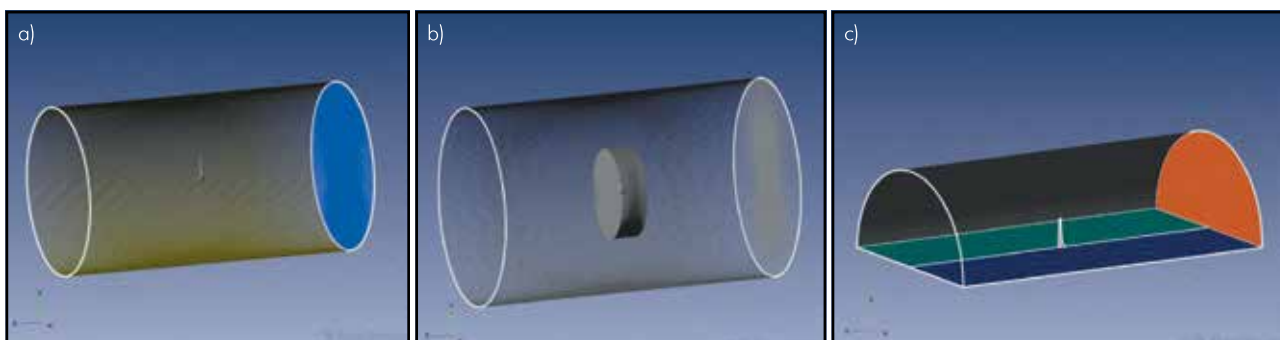


Рис. 2. Расчетные области, использованные для численного моделирования

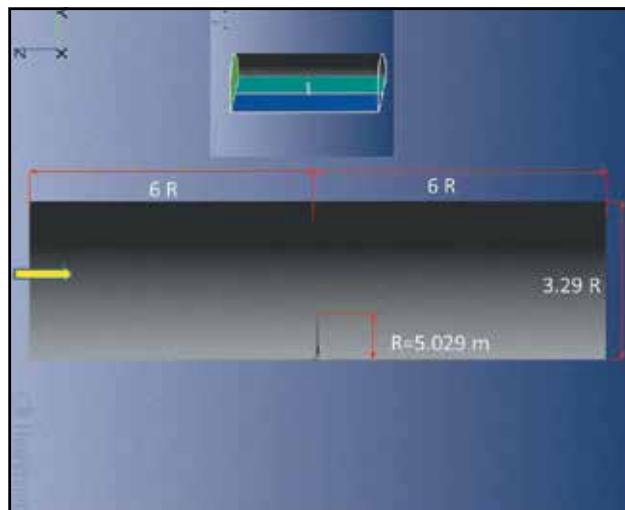


Рис. 3. Размеры расчетной области

Основная часть приведенных ниже рисунков соответствует расчетам на указанной сетке.

Исследования по минимизации сетки проводились в связи с возможным применением программы для проектирования и расчета ветроэнергетических установок. Дело в том, что в процессе инженерного проектирования, особенно на начальных этапах, обычной является практика оперативного выполнения текущих единичных или серийных оценок и расчетов. Как правило, это связано с многовариантностью профилирования лопастей и требованием получения аэродинамически оптимальной (с минимум энергетических потерь) формы лопасти. Оценка эффективности спроектированного варианта установки может быть осуществлена только путем непосредственных расчетов. Естественно, что в этих условиях на первый план выходит быстрдействие выполнения вычислений, напрямую связанное с размерностью сетки.

Размеры расчетной области (рис. 3) в направлении течения были подобраны таким образом, чтобы исключить влияние входных и выходных граничных условий на решение задачи.

## Система уравнений, модель турбулентности и вычислительная сетка

Численно интегрировались осредненные по Рейнольдсу уравнения движения и неразрывности для

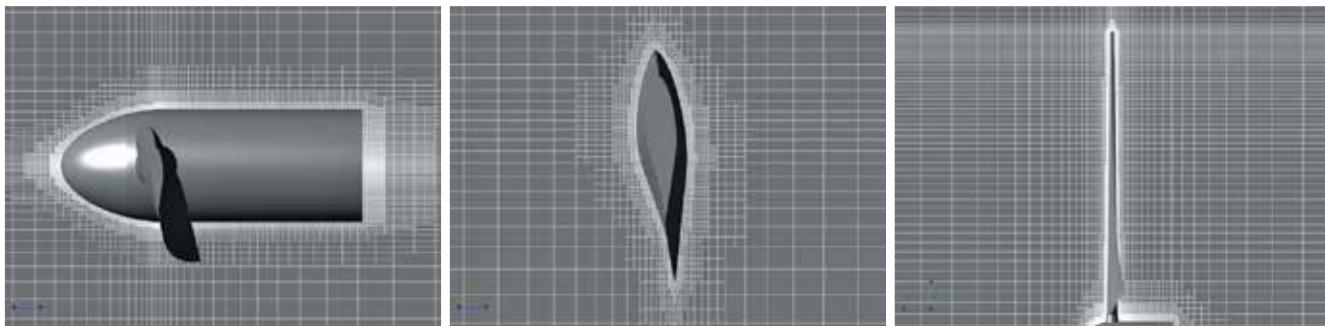


Рис. 4. Фрагменты вычислительных сеток

несжимаемой жидкости. Применение модели несжимаемой жидкости к решению задачи явилось следствием низких чисел Маха  $M$  ( $M < 0.35$ ), реализуемых в области течения.

Для замыкания уравнений движения использовалась низкорейнольдсовая  $k-\epsilon$ -модель турбулентности. Дополнительно отметим, что в расчетах с равным успехом

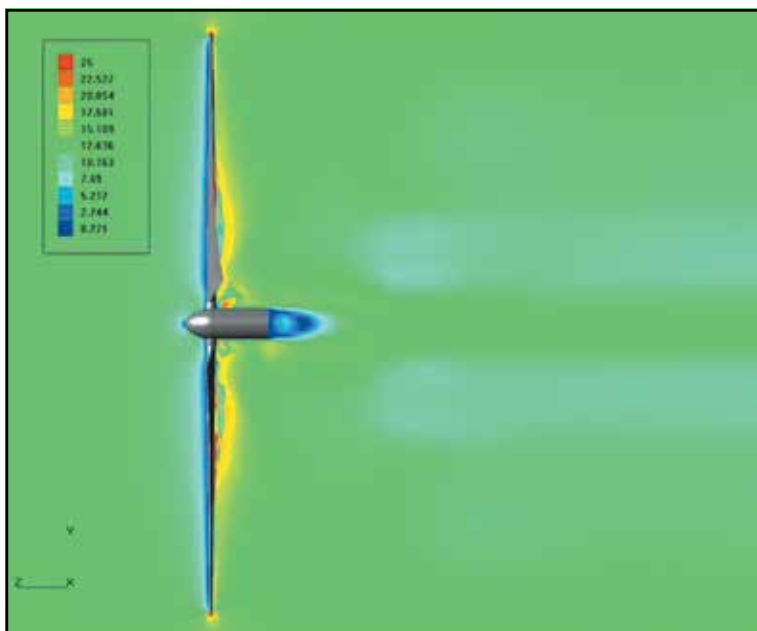


Рис. 5. Распределение модуля абсолютной скорости ротора ВЭУ ( $V_{in} = 13$  м/с)

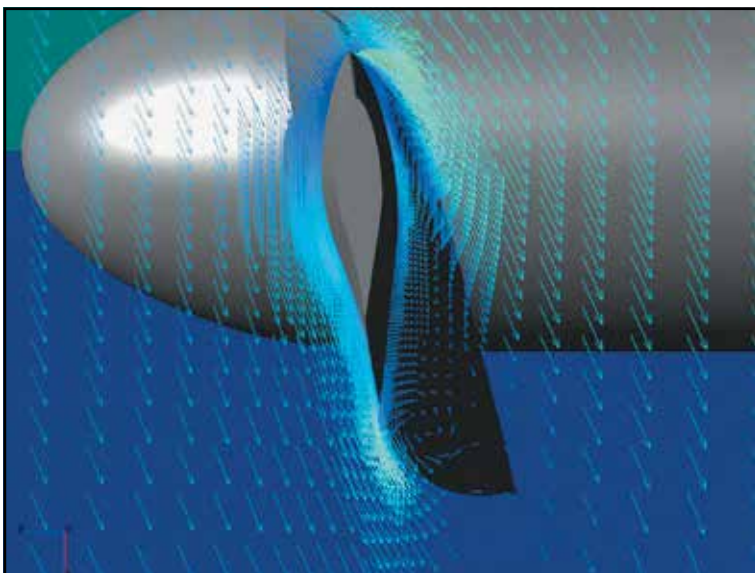


Рис. 6. Векторное поле скоростей в плоскости сечения лопасти ВЭУ ( $V_{in} = 13$  м/с)

может применяться и модель, основанная на переносе турбулентной вязкости. В расчетах с самого начала поток воздуха предполагался турбулентными (степень турбулентности считалась низкой,  $Tu \sim 0,5\%$ ).

В расчетах с приповерхностной сеткой уравнения решались во всей области до стенок ротора. В отсутствие приповерхностных сеток для моделирования течений в пристеночных областях (вблизи поверхностей ротора) применялся широко практикуемый в действительности метод пристеночных функций. Он позволяет решать уравнения не до самой стенки, а до крайних приграничных узлов и довольствоваться параметрами потока в этих узлах сетки для достраивания решения уравнений в промежутке между этими узлами и стенкой. В решателе программы реализованы два набора пристеночных функций: стандартный и оригинальный. Последний был специально разработан для использования в FlowVision. Особенностью оригинального набора является непрерывность и гладкость функций во всем интервале их применения (в логарифмической подобласти пограничного слоя). В данной работе расчеты проводились с оригинальным набором пристеночных функций. Применение метода пристеночных функций является обоснованным для безотрывных течений. Для отрывных течений использование метода становится менее обоснованным.

На рис. 4 показаны фрагменты вычислительных сеток. Применяется измельчение ячеек вблизи стенок ротора (по принятой для FlowVision терминологии, адаптация сетки к геометрии). В периферийном направлении вдоль лопасти также применяется сгущение узлов сетки. В данной работе была использована сетка с 3-мя уровнями адаптации.

## Результаты расчетов

Экспериментальный диапазон скоростей набегающего потока включает 10 значений из интервала 5-25 м/с. Моделирование течения в ветровой энергетической установке выполнялось в полном соответствии с экспериментом: количество и граничные условия расчетов совпадали с экспериментальными. Естественно, что проведение неоднократных серийных расчетов

предполагает использование параллельных вычислений на мощных компьютерах. Подавляющее большинство расчетов на сетках большой размерности были проведены на суперкомпьютерном комплексе МГУ "Ломоносов".

В исследовательских целях по сеточной сходимости решения для безотрывных режимов обтекания установки были использованы сетки большой размерности (7-8 млн ячеек для сеток с четвертым уровнем адаптации сетки и 24-25 млн ячеек для сеток с пятым уровнем адаптации). Для полной сходимости решения на сетках наибольшей размерности требовалось трое суток процессорного времени на суперкомпьютерном комплексе МГУ "Ломоносов". В вычислениях были задействованы 32 процессора с 2-мя ядрами каждый.

Важно отметить, что возможность распараллеливания вычислений в FlowVision позволяет на порядок или более сокращать время для получения решения и удаленно пользоваться суперкомпьютерами.

Ниже приводятся результаты, полученные на сетках размерности менее 1,5 млн ячеек.

На рис. 5 приведено распределение модуля абсолютной скорости на плоскости, проходящей через ось цилиндрической расчетной области. Видно влияние ротора на изменение параметров потока. Скорость набегающего потока для этого случая –  $V_{in} = 13$  м/с.

Для этого же значения скорости на рис. 6 показано поле векторов относительной скорости на плоскости, секущей лопасть ротора на относительной высоте, составляющей 63% высоты лопасти. Характерным для этого режима является формирование массивной отрывной зоны, ухудшающей характеристики установки.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведено на рис. 7 – это то, ради чего, собственно говоря, и были выполнены расчеты. На данном рисунке показан график момента вращения аэродинамических сил, действующих на ротор. Видно, что расчетная кривая отслеживает экспериментальную кривую. Максимальное расхождение результатов составляет 18% от значения экспериментальных данных.

Такое соответствие результатов дает основание полагать, что программный комплекс FlowVision является эффективным инструментом при проектировании ветровых энергетических установок, а по точности не уступает самым лучшим в этом отношении зарубежным программным комплексам, что подтверждается "слепым" сравнением результатов по различным программам, выполненным NREL (рис. 8). Эксперимент на графиках рисунка нанесен черными ромбиками, соединенными толстой линией такого же цвета. Различные значки (пустые и закрашенные), соединенные тонкими линиями, соответствуют различным программам, участвовавшим в сравнительном тестировании. Результаты данной работы нанесены на графиках светло-коричневыми крестиками.

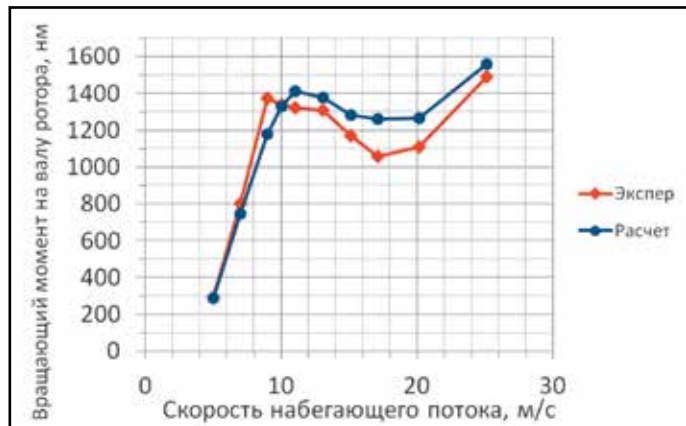


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по вращающему моменту на валу ротора

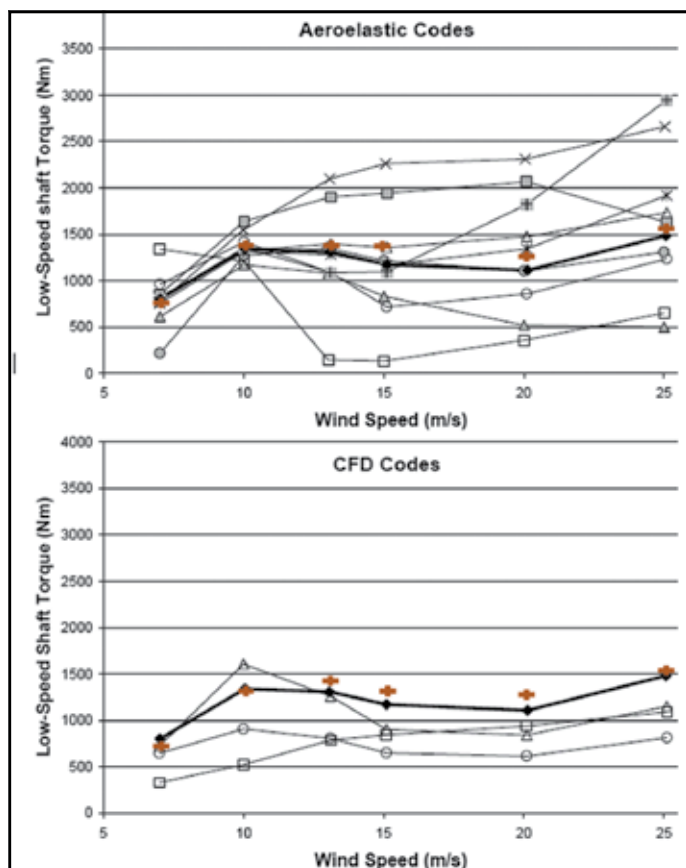


Рис. 8. Слепое сравнение результатов, полученных по различным программам

Справедливости ради отметим, что расчетные результаты на сетках большей размерности (7-8 млн и 24-25 млн ячеек) для безотрывных режимов обтекания (5-9 м/с), которые полностью совпали с экспериментальными данными, не приведены. Для остальных значений скорости (отрывные режимы обтекания) несогласованность между расчетом и экспериментом возрастает, предположительно, вследствие ограниченности метода пристеночных функций.

А. А. Аксенов, П. М. Бывальцев, К. В. Кузнецов,  
И. В. Москалев, В. И. Похилко,  
компания ТЕСИС,  
Cloud Yu, компания Samwells Testing, Тайвань



В С Е Г Д А   Н А   В Ы С О Т Е



# МАКС

# 2015

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ  
САЛОН**



[www.aviasalon.com](http://www.aviasalon.com)

**МОСКВА ● ЖУКОВСКИЙ ● 25-30 АВГУСТА**