

# Аудит характеристик ветрогенераторов с применением *CFD*-моделирования на суперкомпьютере

Ю.В. Кожухов, А.А. Лебедев, А.М. Данилишин, Э.В. Давлетгареев (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем)

## Введение

Энергетические установки на основе использования энергии ветра в настоящее время приобретают различные формы. Это объясняется тем, что их изобретатели стараются как повысить эффективность получения энергии, так и улучшить привлекательность и дизайн, а также уменьшить влияние на окружающую среду.

Проведение исследований на экспериментальных стендах достаточно дорого и требуют значительной квалификации исследователя и специального дорогостоящего оборудования. Однако с появлением вычислительных методов *URANS* (*Unsteady Reynolds average Navie-Stoks*) стоимость численного эксперимента стала на порядок ниже натурного. Такие исследования проводились на кафедре на кластерах при поддержке проф. Ю.Я. Болдырева. Так, для расчета ветроколеса потребовался 4 298 591 элемент расчетной сетки; при этом использовалось 3 (12 ядер) вычислительных узла кластера и 32 Gb RAM. Один расчет занимал порядка двух суток. В настоящее время существует два способа уменьшить время расчетов: увеличение вычислительных ресурсов и применение новых подходов к решению уравнений Навье-Стокса.

Целью работы было доказать необходимость применения суперкомпьютеров для численного моделирования характеристик новых ветрогенераторов.

## Натурный эксперимент

Для любой вновь созданной конструкции ветрогенератора требуется подтверждение проектных характеристик натурными испытаниями. Существует три основных способа натурных испытаний ветроэнергетических установок (ВЭУ):

- 1 аэродинамическая труба;
- 2 буксировка ВЭУ;
- 3 полевые испытания с накоплением статистики [1].

Преимуществами испытаний в аэродинамической трубе являются стабильность потока и возможность проведения эксперимента в любые времена года, недостатками – ограниченность размеров модели, краевые эффекты, высокая стоимость в связи с амортизацией и расположением аэродинамической трубы. Преимуществами испытаний буксировкой являются достаточно

хорошая доступность, открытый воздушный поток, недостатками – погрешности из-за наличия бокового ветра, естественные пульсации скорости (порывы ветра). Преимуществами полевого эксперимента являются доступность и стоимость, реалистичный воздушный поток; недостатки – необходимость накопления статистики и невозможность получения характеристик ветрогенератора в ограниченный промежуток времени.

В качестве объекта для верификационных испытаний численного метода была выбрана модель закрытого ветрогенератора с размерами колес 500 мм, 2000 мм, 2800 мм. Для 500 мм модели испытания были проведены двумя способами: аэродинамическая труба и буксировка. Модель 2000 мм и 2800 мм подверглись испытаниям только буксировкой. У моделей 500 мм и 2000 мм есть полностью идентичные в масштабе проточные части.

## Аэродинамическая труба

Эксперименты проводились в большой аэродинамической трубе Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. Труба имеет диаметр рабочего участка 2 метра. Испытания ветродвигателя в аэродинамической трубе заключались в следующем: на рабочем участке трубы размещался ветродвигатель, на который подавался воздушный поток с постоянной скоростью для режима. На режиме к выходам генератора подсоединялась дискретно изменяемая трехфазная электрическая нагрузка, таким образом, варьировалась мощность, получаемая на генераторе, и регистрировалась характеристика ВЭУ [2].

## Буксировки моделей ВЭУ

Суть способа буксировки состоит в протягивании ветродвигателя по прямому участку с постоянной скоростью [3] и получении характеристик ветродвигателя [2, 4].

### ✓ Экспериментальное исследование модели 500 методом буксировки

Данное исследование показало, что при скорости ветра 5 м/с и 10 м/с, высота крепления модели 1 м (от крыши автомобиля до нижнего габарита обечайки) достаточна для обеспечения удовлетворительного качества однородности потока (не более 10%).

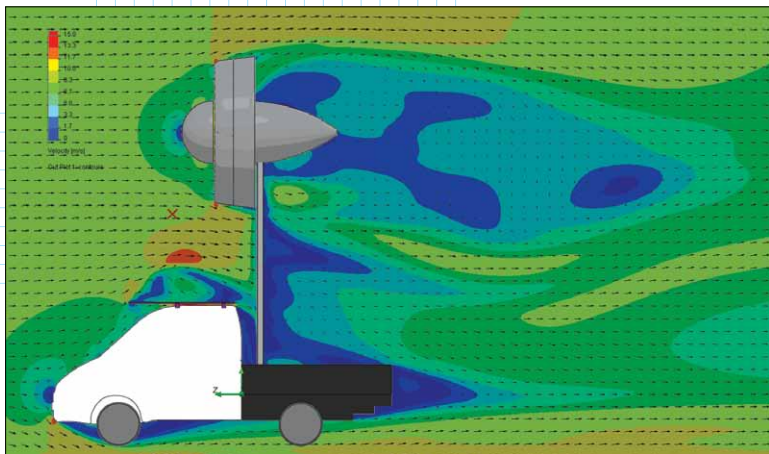


Рис. 1. Продувка автомобиля с установленной на крыше моделью ветрогенератора средствами CFD-пакета

✓ **Экспериментальное исследование модели 2000 методом буксировки**

Перед началом буксировки было проведено численное моделирование обтекания автомобиля с целью определения высоты установки модели над крышей автомобиля, необходимой для получения однородного набегающего потока на ветродвигатель (рис. 1).

В процессе буксировки синхронно записывались мгновенные значения скорости и напряжения, а также тока на генераторе посредством аналого-цифрового преобразователя Е14-440; кроме того регистрировались величины температуры и атмосферного давления. Технология была следующей. Модель ВЭУ буксировалась с разными постоянными скоростями. При этом регистрировались электрические параметры, позволяющие получить значения мощности, при разной выбираемой оператором электрической нагрузке. До буксировки была определена связь между механической мощностью, поданной на ось электрогенератора, и выходной электрической мощностью при различных оборотах в рабочем диапазоне ВЭУ, а также коэффициент преобразования механической мощности в электрическую. Знание этого коэффициента и позволило авторам затем пересчитать показания электрической мощности, регистрируемой в бортовом компьютере, в аэромеханическую мощность ВЭУ.

В результате испытаний модели была получена характеристика ветрогенератора с крыловым обтекателем с турбиной, состоящей из 32-х лопаток направляющего аппарата (НА) и рабочим колесом (РК) из 16-ти лопаток (рис. 2, 3).

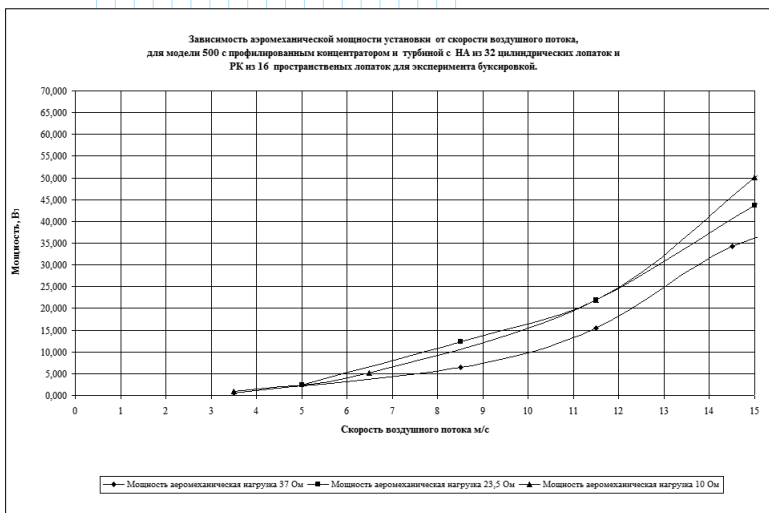


Рис. 2. Пример характеристики ветродвигателя модели 500, полученной посредством буксировки

✓ **Сравнение экспериментов методом буксировки и в аэродинамической трубе для модели 500**

На основании анализа полученных результатов для полностью идентичной модели с одинаковой геометрией (а именно конфигурацией кольцевого крыла, проточной части направляющего аппарата и рабочего колеса) можно увидеть, что характеристики похожи, а значения мощностей различаются в пределах  $\pm 15\%$ . Небольшие различия в значениях, а также сохранение качественного вида характеристики при двух методах испытаний, позволяют сделать вывод о пригодности применения метода буксировки для получения характеристик ветродвигателя [2].

В качестве измерителя мощности был выбран электрический генератор, но для точного определения аэромеханической

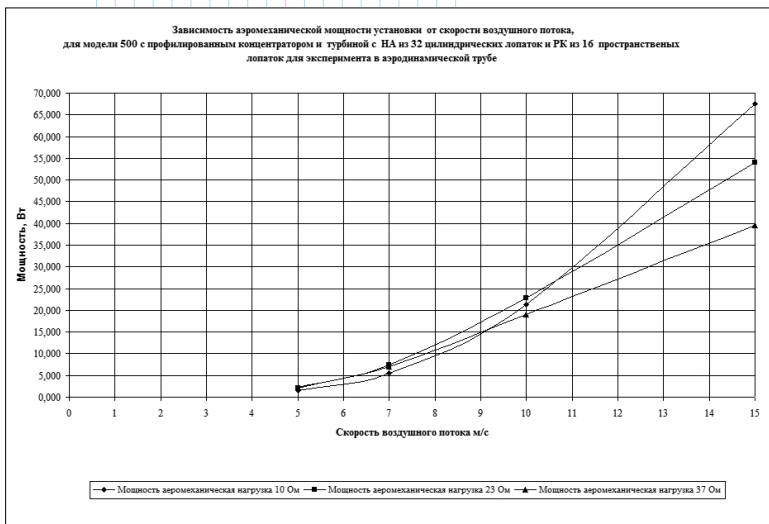


Рис. 3. Характеристика ветродвигателя модели 500, полученная в аэродинамической трубе

мощности потребовалось проведение экспериментального исследования самого генератора при разных нагрузках в диапазоне частот вращения генератора, ожидаемых при испытаниях ветродвигателя.

Электрически генератор представляет собой трехфазную электрическую машину переменного тока, с ротором на постоянных магнитах. В цепи передачи аэромеханической энергии присутствует важное звено – это поликлиновая ременная передача, её КПД достаточно велик и составляет  $0.95 \div 0.97\%$  [2].

В качестве потребителя электрической мощности у генератора выступала нагрузка (эмуляция потребителя), собранная из реостатов, соединенных по схеме “звезда”, с шагом дискретной нагрузки 0.5, 1, 2, 3, 5 Ом. При испытаниях ветродвигателя фиксировались скорость, геометрия модели и устанавливалась нагрузка для пяти подрежимов.

Для измерения значения скорости воздушного потока на крыше автомобиля был установлен анемоскоп (UNI-T UT362); датчик скорости был размещен так, чтобы минимизировать воздействие как со стороны автомобиля, так и со стороны ветродвигателя. Блок управления находился в кабине, и по измеренному значению установившейся скорости принималось решение о записи режима; значения скорости с прибора передавались и сохранялись в компьютере. Технические характеристики: измеряемая скорость ветра  $2 \div 30$  м/с с погрешностью  $\pm 3\%$ , измеряемая температура воздуха от  $0^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

### Численное моделирование методом CFD

Развитие компьютерных, в частности кластерных технологий, позволяет применять методы вычислительной гидродинамики при расчетах вязких течений в турбомашинах. Внедрение численного моделирования в процесс разработки и исследования устройства может снизить затраты на

последующую экспериментальную доработку, а в идеальном случае позволит отказаться от такой вовсе.

Проблема использования программ вычислительной гидродинамики применительно к расчетам течений в турбомашинах описана многими как отечественными, так и зарубежными авторами. В результате эволюции полуэмпирических моделей турбулентности, в настоящее время мы можем резюмировать, что **существующие модели турбулентности достаточно хорошо описывают поведение рабочего тела** через какие-либо элементы сопротивления, что подтверждается сравнением с экспериментальными показателями. Это дает большую свободу действий при решении задач оптимизации геометрии проточной части, внешних задач, не прибегая к постановке эксперимента.

Особенностями моделирования характеристик ветротурбин методами CFD являются большие сетки (сравнимые по количеству ячеек с сетками для расчета нестационарных процессов), а также необходимость проведения расчетов для нескольких точек с малым шагом для получения режима максимальной эффективности [5–9].

Методика расчета газодинамических характеристик ветроустановки включает в себя несколько этапов.

Первый этап – построение геометрической модели – осуществляется с помощью одной из программ 3D-моделирования (рис. 4).

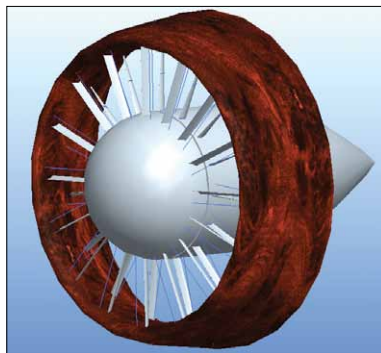


Рис. 4. Трехмерная модель диффузора ветрогенератора

При моделировании был сделан ряд допущений: ставится осесимметричная задача – не рассматривается течение газа в зазорах между рабочим колесом и кольцевым крыловым диффузором ветродвигателя. При решении осесимметричной задачи рассматривается обтекание одной лопатки рабочего колеса (то есть сектор с углом  $360^\circ/32 = 11^\circ 15'$  для модели с 32-мя рабочими лопатками и  $360^\circ/16 = 22^\circ 30'$  для модели с 16-тью рабочими лопатками).

Следующий этап – построение сеточной модели [10,11]. В данном

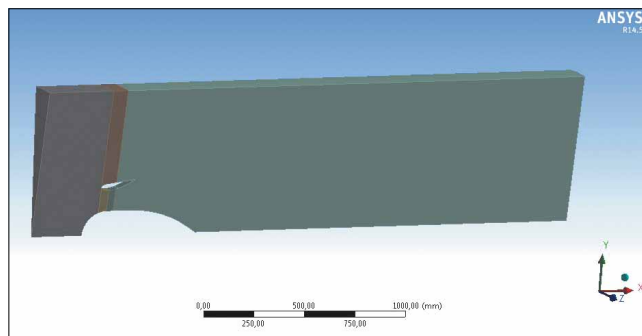


Рис. 5. Общий вид расчетной области

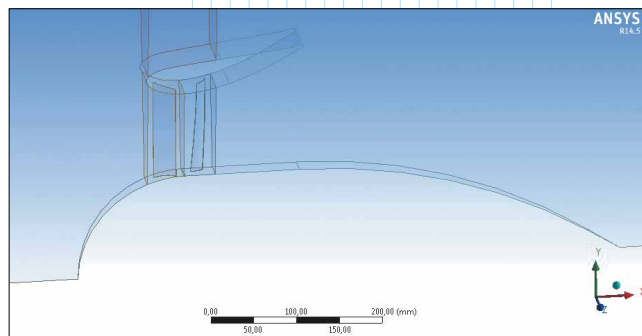


Рис. 6. Расчетная область вблизи ветрогенератора



случае авторами были построены две сеточные модели.

Для преобразования трехмерной модели ветрогенератора с кольцевым крыловым диффузором в трехмерную модель исследуемой области течения использовался модуль *ANSYS DesignModeler*. Расчетная область представляет собой цилиндр диаметром 2.0 м и длиной 6.3 м за вычетом геометрии ветродвигателя (рис. 5, 6). Как видно из рис. 5, расчетная область разбивается на пять частей: области перед ветрогенератором (входная) и за ним (выходная), область между цилиндром диаметром 2 м и кольцевым крыловым диффузором (промежуточная), а также области НА и РК. Это делается для удобства дальнейшего построения расчетной сетки.

С помощью приложения *ANSYS Meshing* была построена неструктурированная сетка. В качестве основных элементов расчетной сетки были выбраны тетраэдры, у стенок – призмы. Для моделирования течения в пограничном слое создавались 5 призматических слоев, сгущенных к стенкам. Общий вид расчетной сетки для различных элементов представлен на рис. 7.

Для области вокруг ветродвигателя использовался тот же подход, что и в первом пункте, а для построения области РК и НА – функционал *ANSYS BladeModeler* в *ANSYS DesignModeler*. Для НА и РК в приложении *Turbogrid* (входит в пакет *ANSYS CFX*) были построены расчетные блочно-структурированные сетки. Сетки состоят из гексаэдров с необходимыми сгущениями у стенок и лопаток.

Неструктурированная сетка для остальной части расчетной модели была построена в приложении *ICEM* (входит в пакет *ANSYS*). Она состоит из тетраэдров в

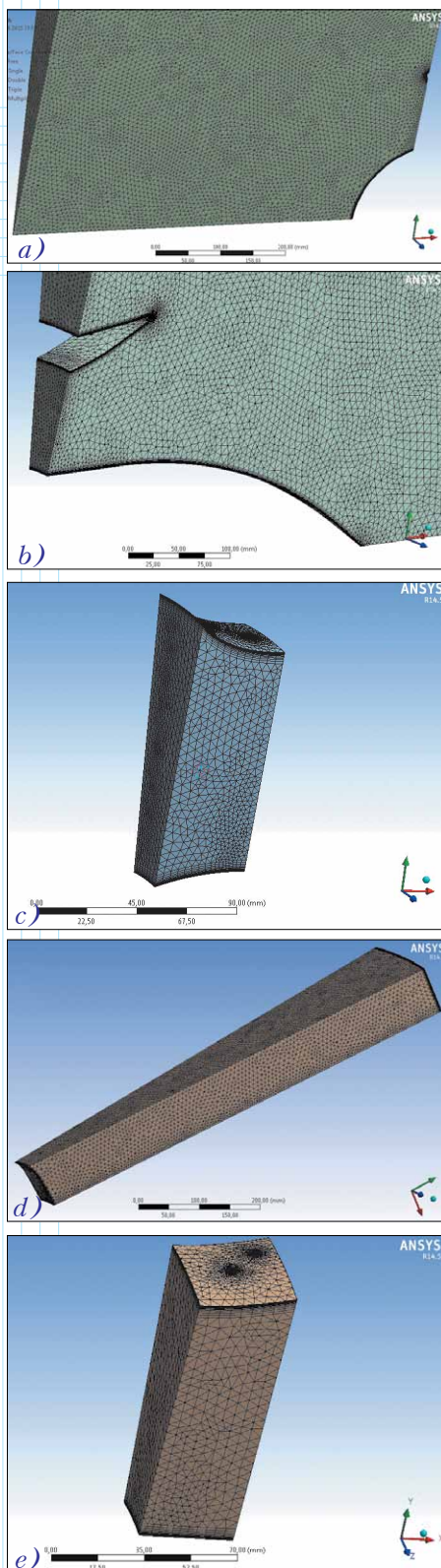


Рис. 7. Расчетная сетка для различных элементов: а) входная часть; б) выходная часть; в) направляющий аппарат; д) промежуточная часть; е) РК

ядре потока и пяти пристеночных призматических слоев, сгущенных к стенке.

Общий вид расчетной сетки для второго варианта представлен на рис. 8.

При построении учитывались общие рекомендации по построению расчетных сеток, используемые при решении других классов газодинамических задач: отношение размеров двух соседних ячеек в области наибольших градиентов не должно превышать значения 1.25, а

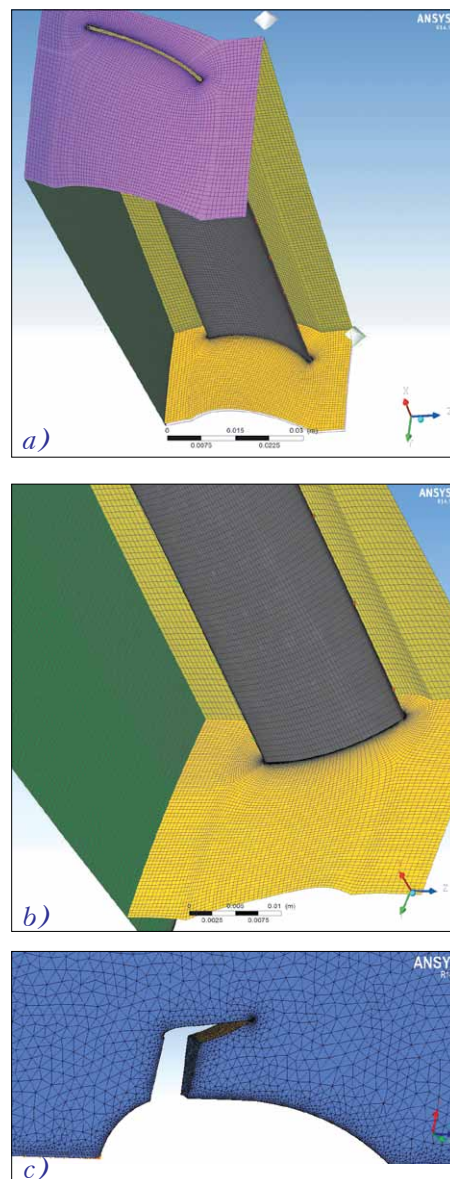


Рис. 8. Общий вид расчетной сетки: а) направляющий аппарат; б) рабочее колесо; в) остальная область

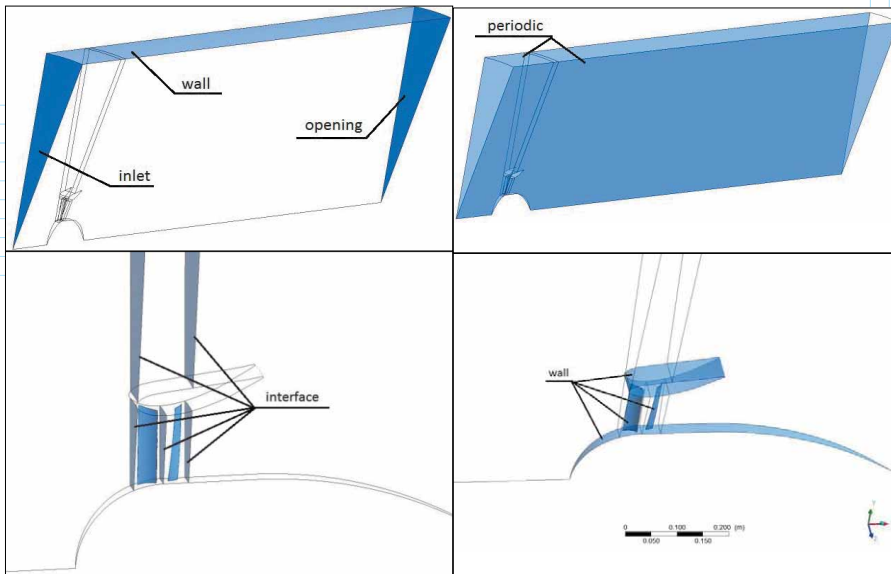


Рис. 9. Схема задания граничных условий

на межлопастных границах – 2. После построения сетки производился контроль её качества. Оценочным параметром служил параметр *Quality* (качество), величина которого не должна быть менее 0.1.

Максимальное значение безразмерной пристеночной координаты  $Y_{max}$  для сетки из первого пункта равно 80.29, а для сетки второго типа – 102.34. Таким образом, были построены сетки с количеством элементов: для первой модели – 9050 тысяч; для второй – 6593 тысяч.

Постановка граничных условий для расчетной сетки, построенной в *ANSYS Meshing* (при соединенных вместе входной и выходной части,

температуры, соответствующие условиям моделируемого эксперимента.

На поверхности *Opening*, через которую поток выходит из расчетной области, задавалось значение полного давления и полной температуры, соответствующие режиму работы ступени. На поверхностях *Periodic* задавалось условие радиальной периодичности (*Rotational Periodicity*) (значения параметров потока в соответствующих узлах расчетной сетки совпадают).

На поверхностях *Wall* задавалось условие твердой стенки, свойствами которой являются непроницаемость и прилипание к ней молекул воздуха.

На поверхностях *Interface* для передачи потока между неподвижными элементами применялась опция *Stage*. Для передачи параметров потока без изменения между вращающейся и неподвижными расчетными областями задавалась опция *Frozen Rotor* (“замороженный” ротор). При этом условия контактирующие сетки являются фиксированными друг относительно друга; поток в неизменном виде переходит из одной области в другую [12].

Для расчетной сетки рабочего колеса задавалось вращение с указанием числа оборотов в зависимости от режима, для расчетных сеток остальных элементов было поставлено условие неподвижности.

При проведении численного эксперимента использовалась *SST*-модель турбулентности, поскольку она является

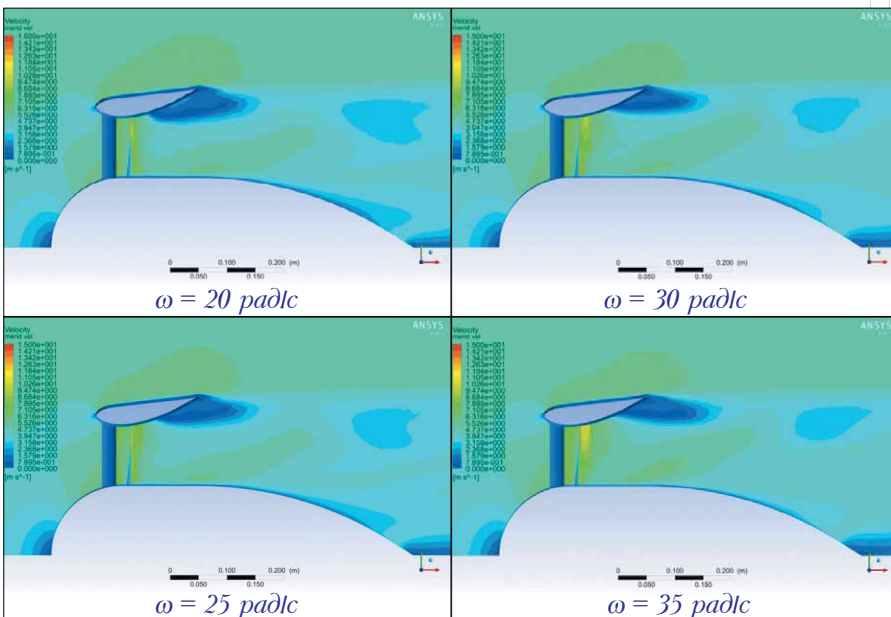


Рис. 10. Картины течений в меридиональном сечении ( $c = 5 \text{ м/с}$ ) при разной нагрузке



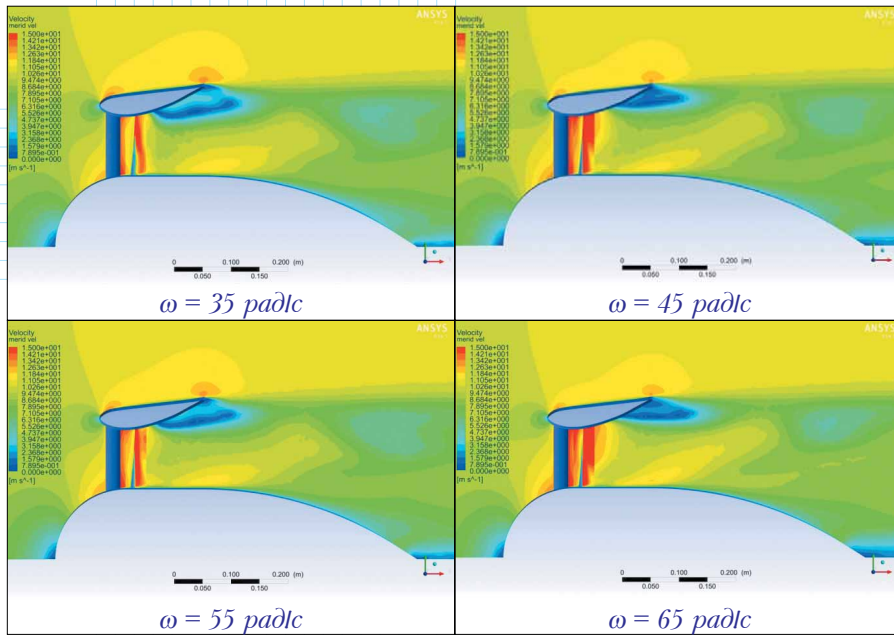


Рис. 11. Картины течений в меридиональном сечении ( $c = 10 \text{ м/с}$ ) при разной нагрузке

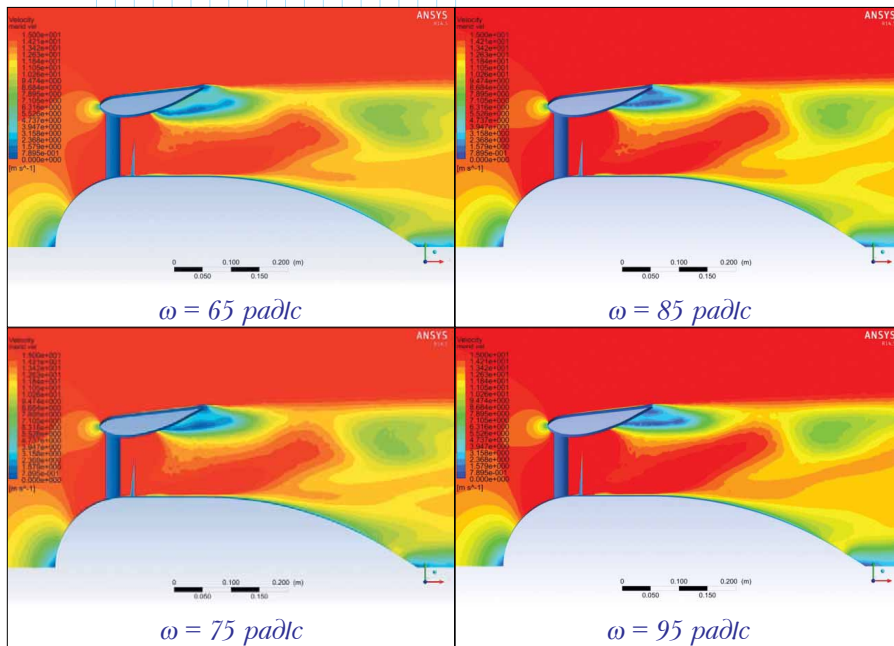


Рис. 12. Картины течений в меридиональном сечении ( $c = 15 \text{ м/с}$ ) при разной нагрузке

наиболее универсальной и разработана на основе базовых проверенных моделей  $k-\varepsilon$  и  $k-\omega$ . Модель  $k-\varepsilon$  задавалась для нескольких режимов – для сравнения полученных результатов с моделью SST.

Для задания граничных условий, не зависящих от режима, были взяты нормальные условия окружающей среды. В качестве исходных данных для задания граничных условий при различных режимах работы ветродвигателя с кольцевым крыловым диффузором выступали частота вращения  $\omega$  [рад/с] и скорость потока  $c$  [м/с].

### Результаты CFD-расчетов

Эксперимент – как численный, так и натурный – проводился для нескольких конфигураций моделей с разными профилями лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата. Полученные по результатам моделирования картины течений в меридиональном сечении и характеристики для одной конфигурации модели показаны на рис. 10÷12.

Сопоставление значений мощности, полученных по результатам расчета и полученных экспериментально при продувке в аэродинамической трубе диаметром 2 м, для модели с 32-мя лопатками рабочего колеса представлены на рис. 13.

Для сравнения приведем результаты расчета на суперкомпьютере ветротурбины мощностью 2000 Вт для разных сеток (табл. 1). Как мы видим, расчет характеристики ветрогенератора – затратный по времени процесс.

Табл. 1. Результаты расчета на различных сетках одного режима

Тип области	2п	2п	2п	сектор	сектор	2п
Тип сетки	гексаэдр	гексаэдр	гексаэдр	тетраэдр	тетраэдр	тетраэдр
Время расчета, мин	600	1 140	840	44	220	420
Число ячеек, млн.	11.83	21.32	19.16	5.94	6.42	19.26
Число ячеек на турбине, млн.	6.51	6.51	7.15			
Крутящий момент, Н·м	163.9	163.4	173.3	185.5	143.6	143.3
Мощность, Вт	2294.9	2287.0	2426.0	2596.9	2011.0	2006.3

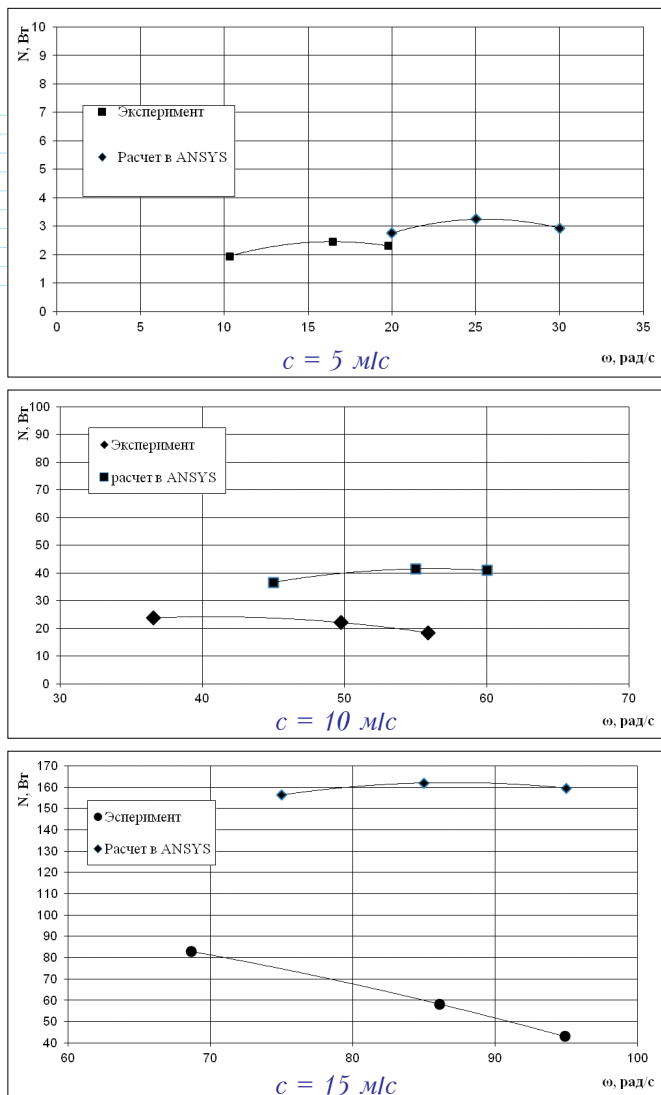


Рис. 13. Зависимость мощности ветрогенератора от частоты вращения при разной скорости потока на входе в расчетную область

## Заключение

Целью работы было доказать необходимость применения суперкомпьютеров для численного моделирования характеристик новых ветрогенераторов, чтобы избежать ошибок проектирования. Работа основывалась на реальных экспериментальных данных, что является важным для верификации расчетных методов [4]. Также можно отметить возможность визуализации и анализа потока при расчете в среде *ANSYS CFX*, которые позволяют определить участки отрыва и обратного течения при обтекании ветроустановки. Это дает возможность значительно повысить качество элемента обтекаемой части, улучшить модель ветротурбины. В дальнейшем авторы планируют применить в расчетах другие модели турбулентности, варьировать размеры сетки и количество ячеек. ☺

## Литература

1. Хорлоkk Дж.Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика). Москва: Машиностроение, 1972, 212 с.
2. Лебедев А.А., Лезов Г.К., Хорошев Е.Н. Отчет по I этапу работ гранта №11 фонда “Сколково” / Под ред. Р.А. Измайлова, С.Ю. Дудникова. Санкт-Петербург: ООО “Опtifлейм Солюшенз” (21 апреля 2011 года).
3. ГОСТ Р 52302-2004. Автоотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний.
4. Экспертное заключение ФГУП ЦАГИ (9 апреля 2012 года) на Отчет, подготовленный ООО “Опtifлейм Солюшенз” по I этапу работ гранта №11 фонда “Сколково”.
5. *ANSYS CFX 14.5. User’s Manual*, 2014.
6. Danilishin A.M., Kozhukhov Y.V., Yun V.K. *Multi-objective optimization for impeller shroud contour, the width of vane diffuser and the number of blades of the centrifugal compressor stage based on the CFD calculation*. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2015, vol. 90, conference 1, 12047.
7. Izmaylov R., Lebedev A. *Centrifugal compressor surge detecting method based on wavelet analysis of unsteady pressure fluctuations in typical stages*. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2015, vol. 90, conference 1, 012052.
8. Izmaylov R.A., Dudnikov S.Y., Lebedev A.A., Khoroshev E.N., Chumakov Y.S. *Small wind turbine aerodynamics: old wine in new bottle*. The 13<sup>th</sup> International Symposium on Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines. Tokyo (Japan), 2012.
9. Izmaylov R.A., Dudnikov S.Y., Lebedev A.A., Khoroshev E.N., Chumakov Y.S., Melnikov Y.B. *Aerodynamics of small wind turbine: a new game on old ground*. International symposium SYMKOM. Lodz (Poland), 2011.
10. Трибунская К.С., Кожухов Ю.В. Проведение численного эксперимента и анализ данных расчета ступени осевого компрессора турбомодуля в программном комплексе *ANSYS CFX*. Материалы международной научно-практической конференции “XLI Неделя науки СПбГПУ”. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2012, ч. III, с. 102.
11. Решетникова Л.В., Жалмурзиева Г.И., Кожухов Ю.В. Численный эксперимент в программном комплексе *ANSYS CFX* для рабочего колеса и безлопаточного диффузора модельной центробежной компрессорной ступени средней быстроходности. Материалы международной научно-практической конференции “XLI Неделя науки СПбГПУ”. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2012, ч. III, с. 104.
12. Гилев К.О. Моделирование характеристик энергетической установки, состоящей из объемного компрессора, приводимого в действие диффузорным ветрогенератором, с варьированием количества лопаток проточной части. Магистерская работа, специальность 13.03.03 “Энергетическое машиностроение”. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2015, 68 с.