

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.

Целью работы было доказать необходимость применения суперкомпьютеров для численного моделирования характеристик новых ветрогенераторов для избежания ошибок проектирования. Работа основывалась на реальных экспериментальных данных, что является важным для верификации расчетных методов. Также можно отметить возможность визуализации и анализа потока при расчёте в ANSYS CFX, которые позволяют определить участки отрыва и обратного течения при обтекании ветроустановки. Это позволяет значительно повысить качество элемента обтекаемой части, улучшить модель ветротурбины. В дальнейшем планируется применение других моделей турбулентности, размеров сетки, количества ячеек

Ключевые слова: Ветрогенератор, кластер, суперкомпьютер, CFD моделирование, ANSYS.

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 дороги 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 натурального. Такие исследования проводились на кафедре на кластерах при поддержке проф. Ю.Я. Болдырева. Так, для расчета ветроколеса потребовалось 4298591 элементов расчетной сетки, использовалось 3 (12 ядра) вычислительных узлов кластера, 32 Гб RAM. Один расчет потребовал порядка 2 суток. В настоящее время существует два подхода снижения времени расчета: 1 - увеличение вычислительных ресурсов; 2 - применение новых подходов к решению уравнений Навье-Стокса, а также увеличения вычислительных мощностей.

Натурный эксперимент: аэродинамическая труба и буксировка

Для любой, вновь созданной конструкции ветрогенератора, требуется подтверждение проектных характеристик натурными испытаниями. Существует три основных способа испытаний ветрогенераторов: аэродинамическая труба, буксировка, и полевые испытания с накоплением статистики[10]. 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 является доступность и стоимость, реалистичный воздушный поток, недостатками являются необходимость накопления статистики и невозможность в ограниченный промежуток времени получения характеристик ветрогенератора.

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

Аэродинамическая труба

Проведение экспериментов одним из способов производилось в большой аэродинамической трубе Санкт Петербургского государственного Политехнического Университета Петра Великого. Труба имеет диаметр рабочего участка 2метра. 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[9].

Буксировки моделей ВЭУ

Суть способа буксировки состоит в протягивание ветродвигателя по прямому участку с постоянной скоростью[3], и получение характеристик ветродвигателя [9,11].

Экспериментальное исследование модели 500 методом буксировки.

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

Экспериментальное исследование модели 2000 методом буксировки.

Перед началом буксировки было проведено численное моделирование обтекания автомобиля, с целью определения высоты установки модели над крышей автомобиля, с тем, чтобы получить однородный набегающий поток на ветродвигатель рис 1. Испытание методом буксировка модели 2000 общее расположение и монтаж установки вместе с измерителем скорости ветра рис. 9.

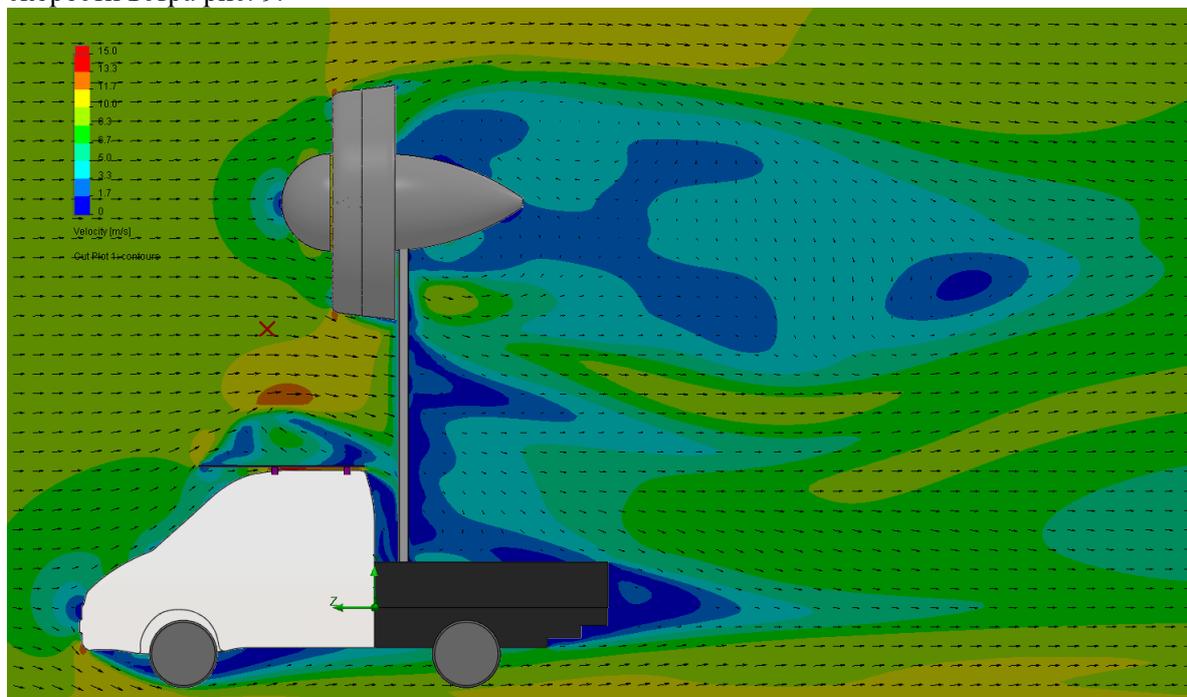


Рис. 1. Продувка автомобиль газель с установленной моделью ветрогенератора в CFD.

В процессе буксировки записывались синхронно мгновенные значения скорости и напряжения, а также тока на генераторе посредством аналогоцифрового преобразователя Е14-440, также регистрировались величины температуры и атмосферного давления. Технология снятия характеристики заключалась в буксировании модели ВЭУ с разными скоростями, в движении с постоянной скоростью. 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 рабочего диапазона ВЭУ а так же коэффициент преобразования механической мощности в электрическую. Знание этого коэффициента и позволило нам 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 лопаток направляющего аппарата и рабочим колесом из 16 лопаток. (рис. 2-3).

Сравнение экспериментов методом буксировки и в аэродинамической трубе для модели 500

На основании полученных результатов рис. 10 и рис. 11 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 $\pm 15\%$. Полученные 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.[9]

Зависимость аэромеханической мощности установки от скорости воздушного потока, для модели 500 с профилированным концентратором и турбиной с НА из 32 цилиндрических лопаток и РК из 16 пространственных лопаток для эксперимента буксировкой.

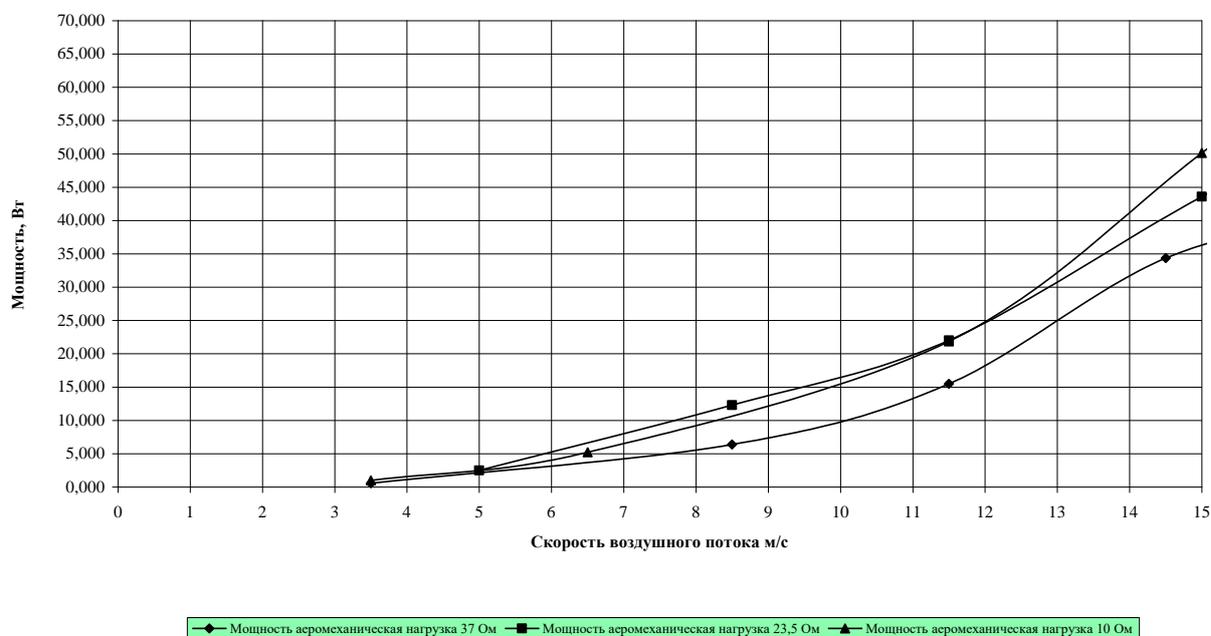


Рис. 2. Пример характеристики ветродвигателя модели 500, полученная посредством буксировки.[9]

Зависимость аэромеханической мощности установки от скорости воздушного потока, для модели 500 с профилированным концентратором и турбиной с НА из 32 цилиндрических лопаток и РК из 16 пространственных лопаток для эксперимента в аэродинамической трубе

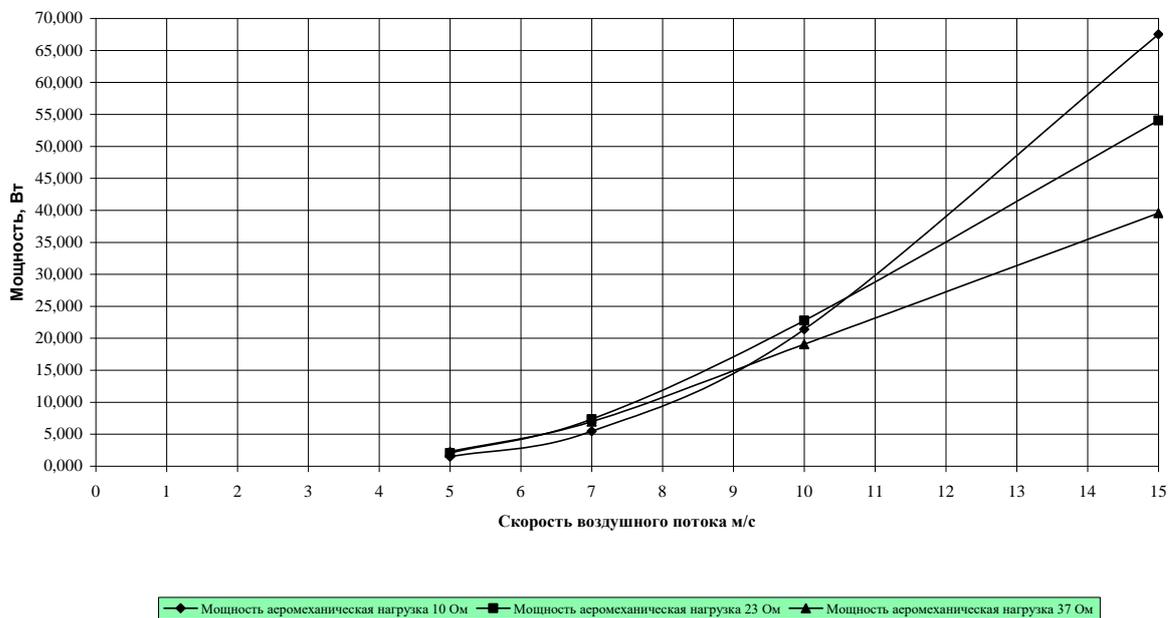


Рис. 3. Характеристика ветродвигателя модели 500, полученная в аэродинамической трубе.[9]

В качестве измерителя мощности был выбран электрический генератор, но для точного определения аэромеханической 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 ... 0.97% [9]

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 Юнит 362.(UNI-T UT362), датчик скорости был размещен так, чтобы минимизировать воздействие как со стороны автомобиля, так и со стороны ветротродвигателя, 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...30 м/с с погрешностью ($\pm 3\%$), измеряемая температура воздуха 0...+40°C с погрешностью ($\pm 3^\circ\text{C}$).

Численное моделирование в 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 отказаться от таковой 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

с течением времени, в настоящее время мы можем резюмировать, что существующие модели турбулентности достаточно хорошо описывают поведение рабочего тела через какие-либо элементы сопротивления в сравнении с экспериментальными показателями. Это дает большую свободу действий при решении задач оптимизации геометрии проточной части, внешних задач, не прибегая к постановке эксперимента. Особенности моделирования характеристик ветротурбин методами CFD расчетов являются большие сетки, сравнимые по количеству ячеек с расчетами нестационарных процессов, а так же необходимость проведения расчетов для нескольких точек с малым шагом для получения режима максимальной эффективности.[12,13,14,15,16]

Методика расчета газодинамических характеристик ветроустановки состоит из нескольких этапов

Первый этап - построение геометрической модели. Производится в одной из программ пространственного моделирования рис 4. При моделировании был сделан ряд допущений: ставится осесимметричная задача – не рассматривается течение газа в зазорах между рабочим колесом и кольцевым крыловым диффузором ветродвигателя. При осесимметричной задаче рассматривается обтекание одной лопатки РК, т.е. сектор с углом $360^\circ/32 = 11^\circ15'$ для модели 32 рабочими лопатками и $360^\circ/16 = 22^\circ30'$ для модели с 16 рабочими лопатками

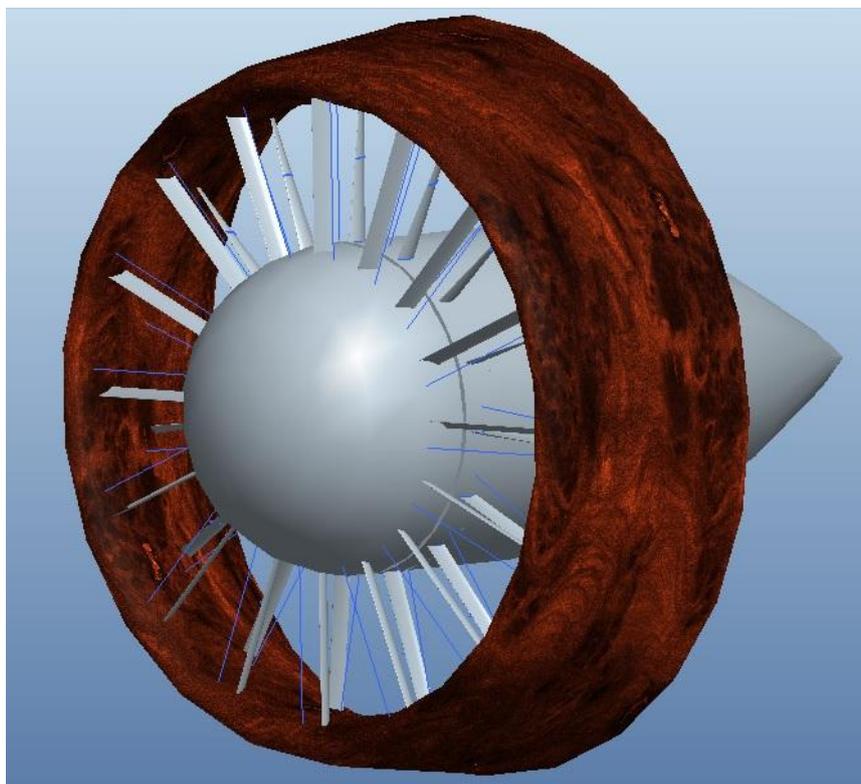


Рис. 4. Трехмерная модель диффузорного ветрогенератора [2]

Следующим этапом было построение сеточной модели [7, 8]. Были построены две сеточные модели: А) 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 и 6). Как видно из рис. 5, расчетная область разбивается на 5 частей – область перед ветрогенератором и за ним, область между цилиндром диаметром 2 м и кольцевым крыловым диффузором (промежуточная часть), а также области НА и РК. Это делается для дальнейшего удобства построения расчетной сетки.

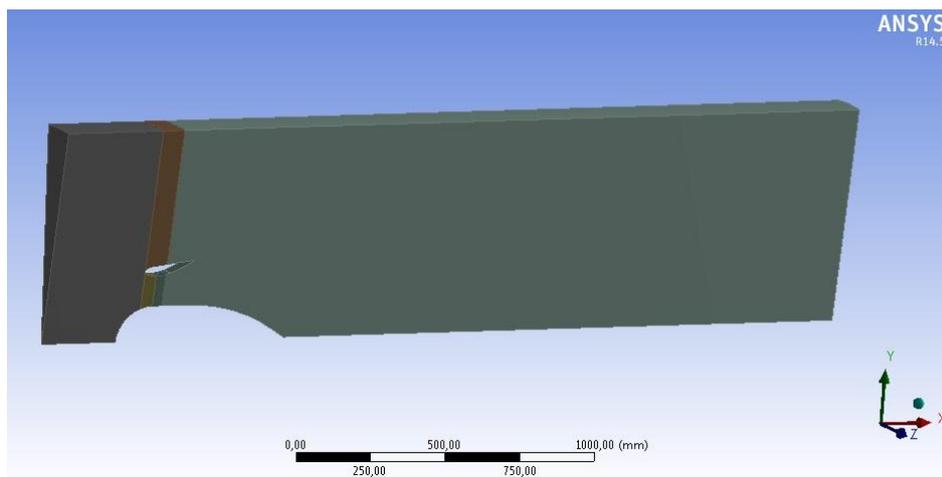


Рис. 5. Общий вид расчетной области[2]

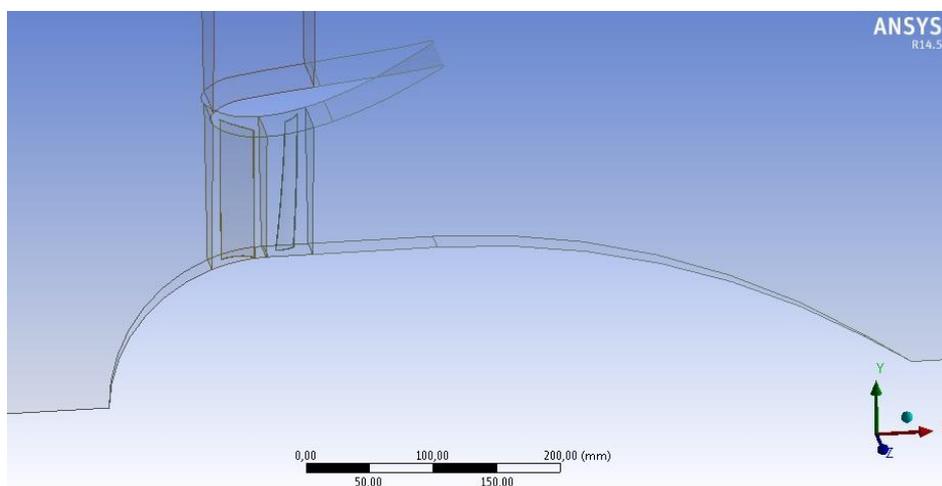
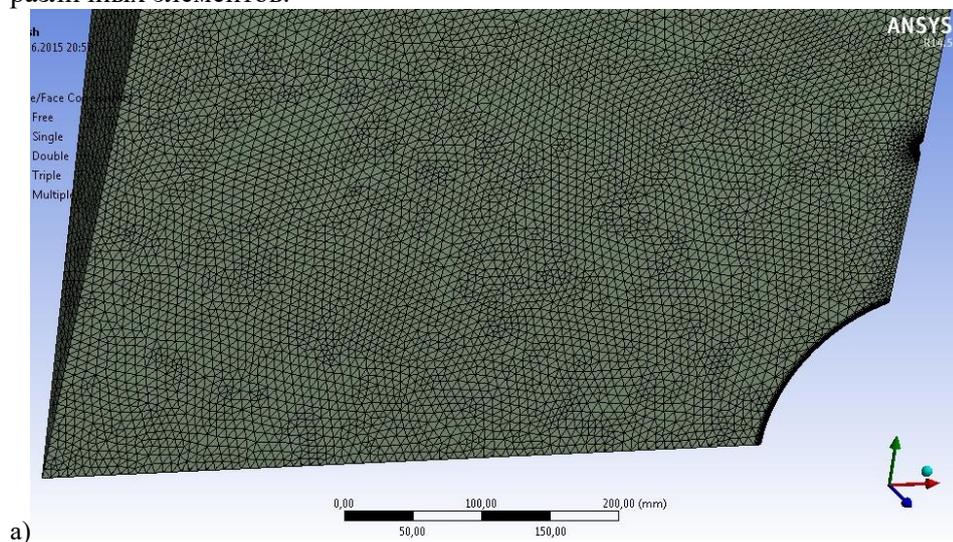
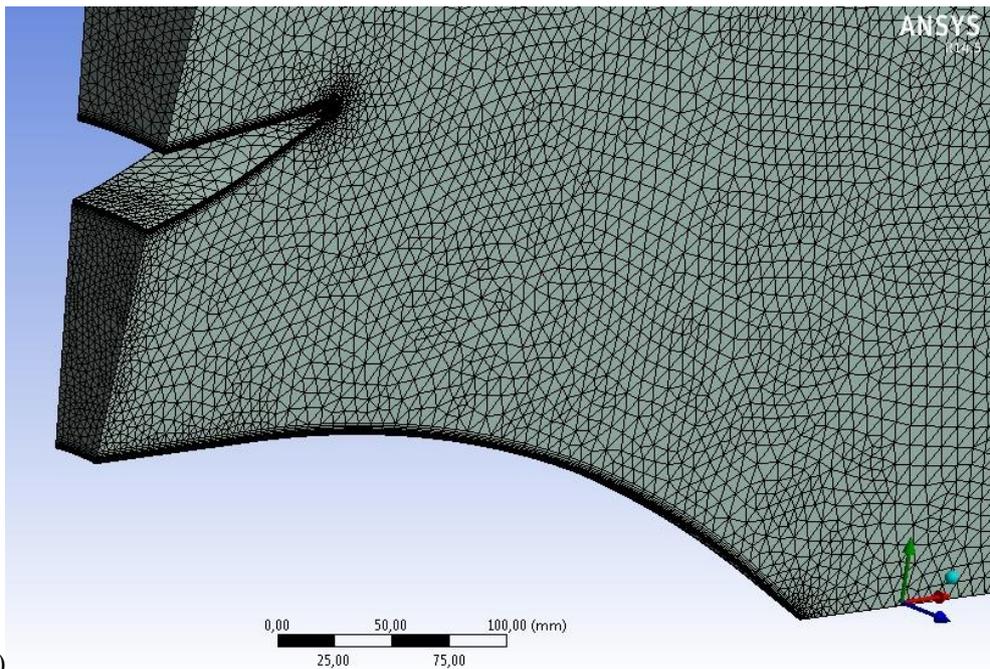


Рис. 6. Расчетная область вблизи ветрогенератора [2]

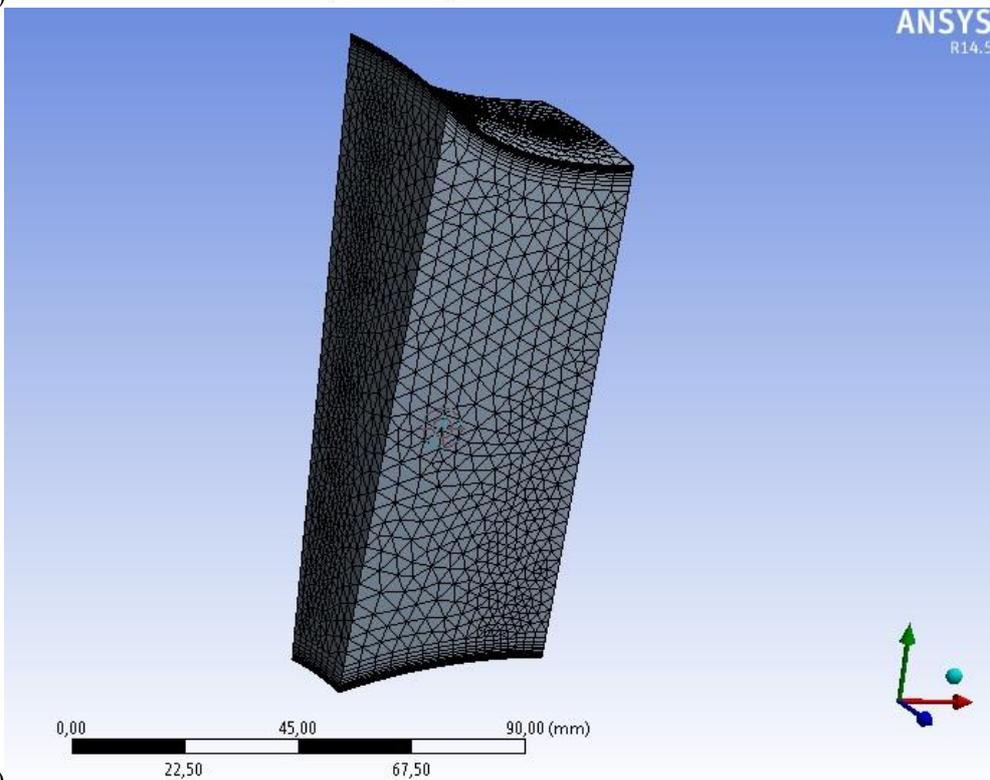
В подпрограмме ANSYS MESH была построена неструктурированная сетка. В качестве основных элементов расчетной сетки выбраны – тетраэдры, у стенок – призмы. Для моделирования течения в пограничном слое создавались 5 призматических слоёв, сгущенных к стенкам. Ниже представлены рисунки 7.а-г, показывающие общий вид расчетной сетки для различных элементов.



а)



б)



в)

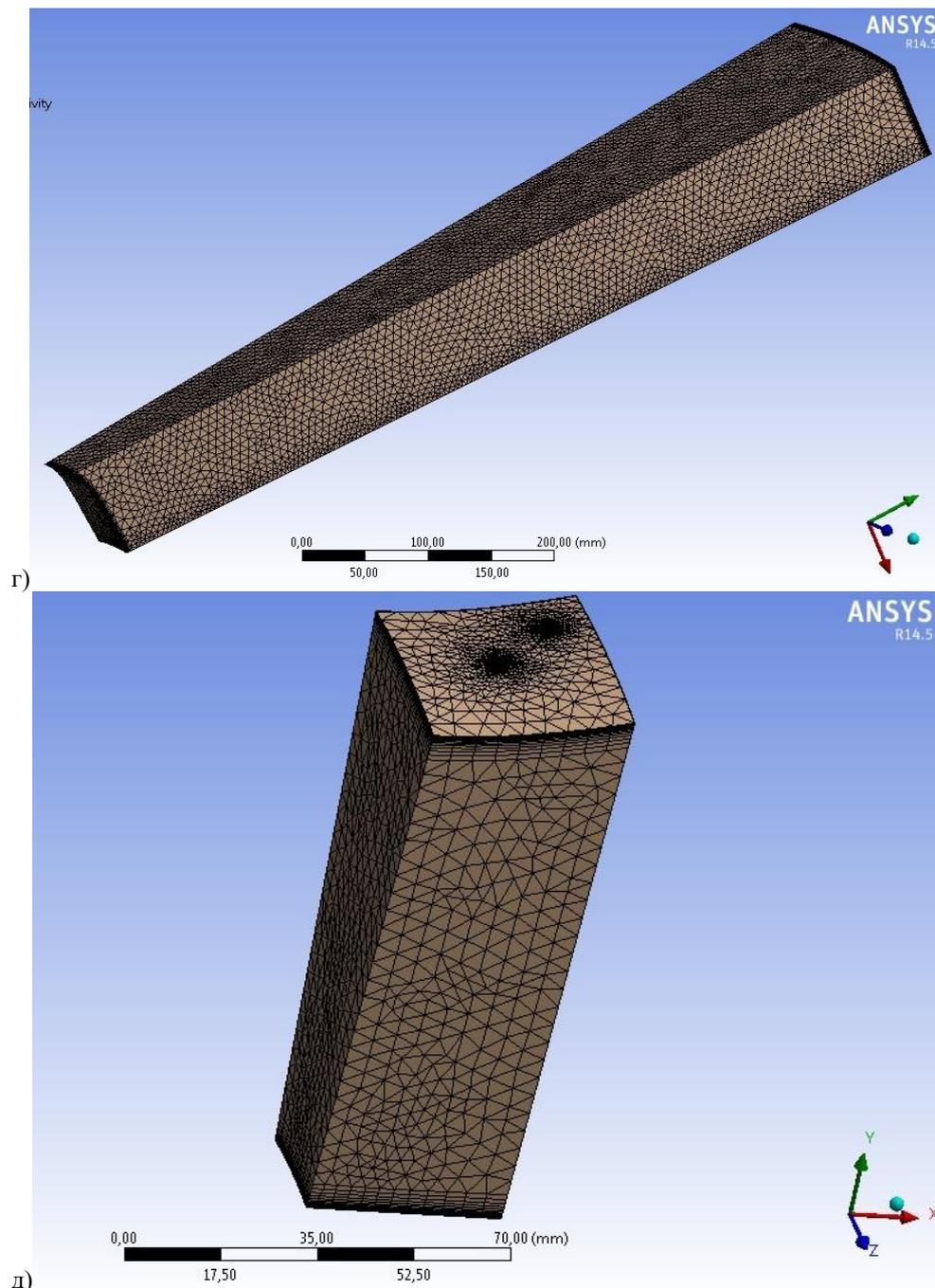
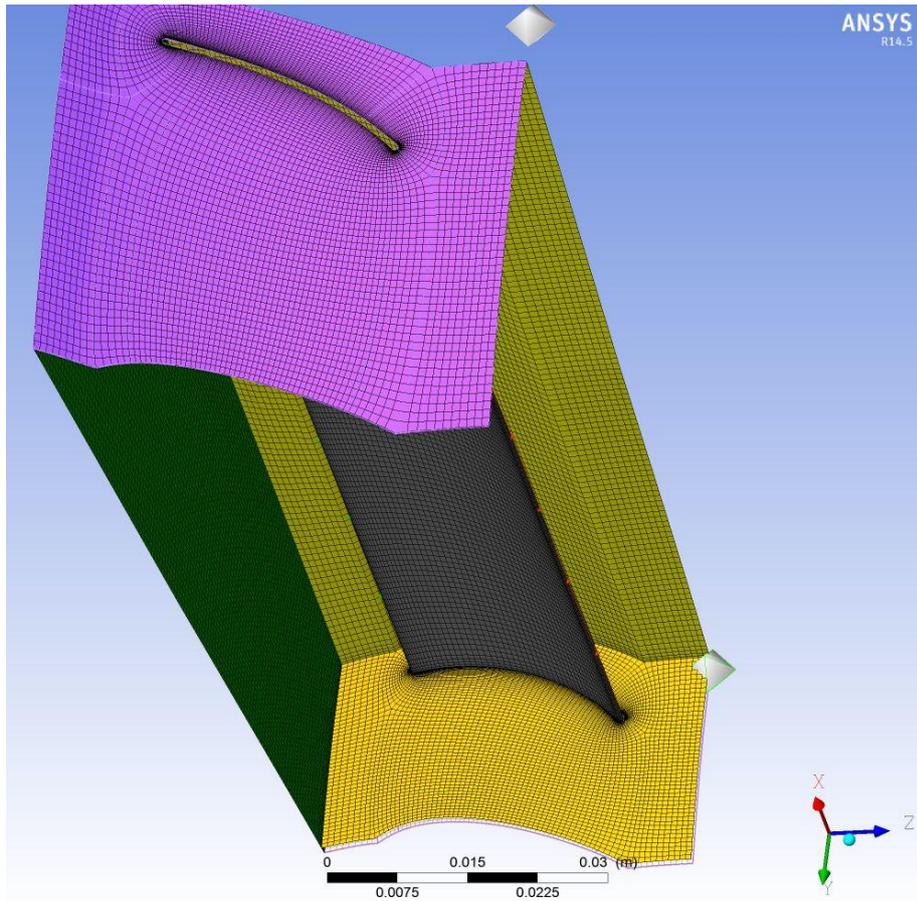


Рис. 7. Расчетная сетка для: а) входной части, б) выходной части, в) НА, г) промежуточной части, д) РК[2]

Для построения области вокруг ветродвигателя использовался тот же подход, что и первом пункте, а для построения области РК и НА применялся ANSYS BladeModeler в ANSYS DesignModeler. Для НА и РК в приложении Turbogrid (входящий в пакет Ansys CFX) были построены расчётные блочно-структурированные сетки. Сетки состоят из гексаэдров с необходимыми сгущениями у стенок и лопаток. Для остальной части расчетной модели была построена неструктурированная сетка в приложении ICEM (входящий в пакет Ansys). Сетки состоят из тетраэдров в ядре потока и из 5 пристеночных призматических слоёв, сгущённых к стенке. На рисунке 8 представлен общий вид расчётной сетки для второго варианта.



a)

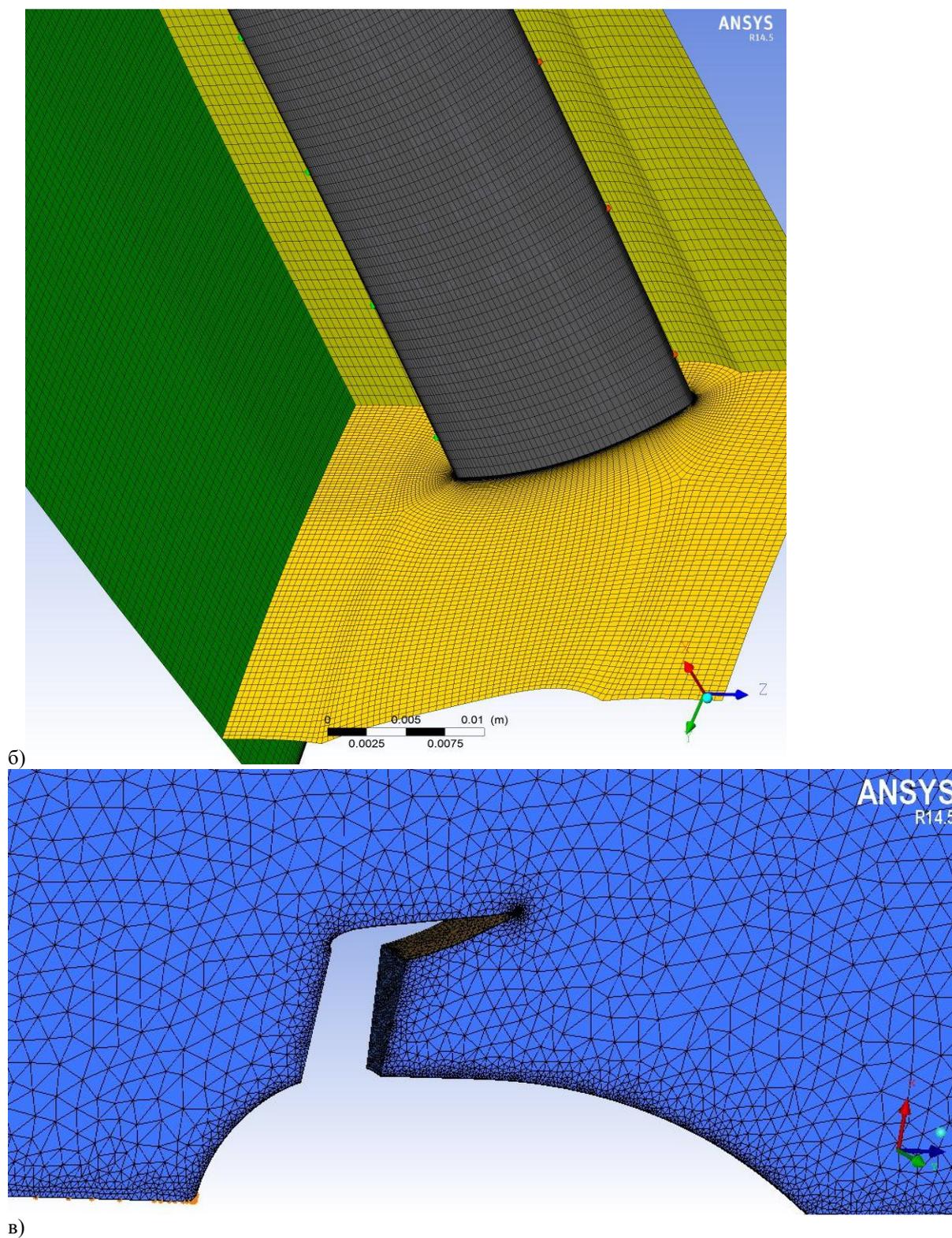


Рис. 8. Общий вид расчётной сетки: а) НА, б) РК, в) остальная область[2]

При построении сетки учитывались общие рекомендации по построению расчетных сеток, используемые при решении других классов газодинамических задач:- при построении расчетной сетки отношение размеров двух соседних ячеек в области наибольших градиентов не должно превышать значения 1,25, на межблочных границах – 2. После построения сетки производился контроль её качества. В качестве оценочного параметра использовался параметр – quality (качество), который должен быть равен не 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 тыс. и 6593 тыс. для второй. [2]

Постановка граничных условий для расчетной сетки, построенной в ANSYS MESH, при соединенных вместе входной и выходной части, РК, НА и промежуточной части, реализовывалась по схеме, представленной на рис. 9 [1]. Во втором случае входная, выходная и промежуточная части объединены в одну. Это означает, что и граничных условий на ней будет меньше.

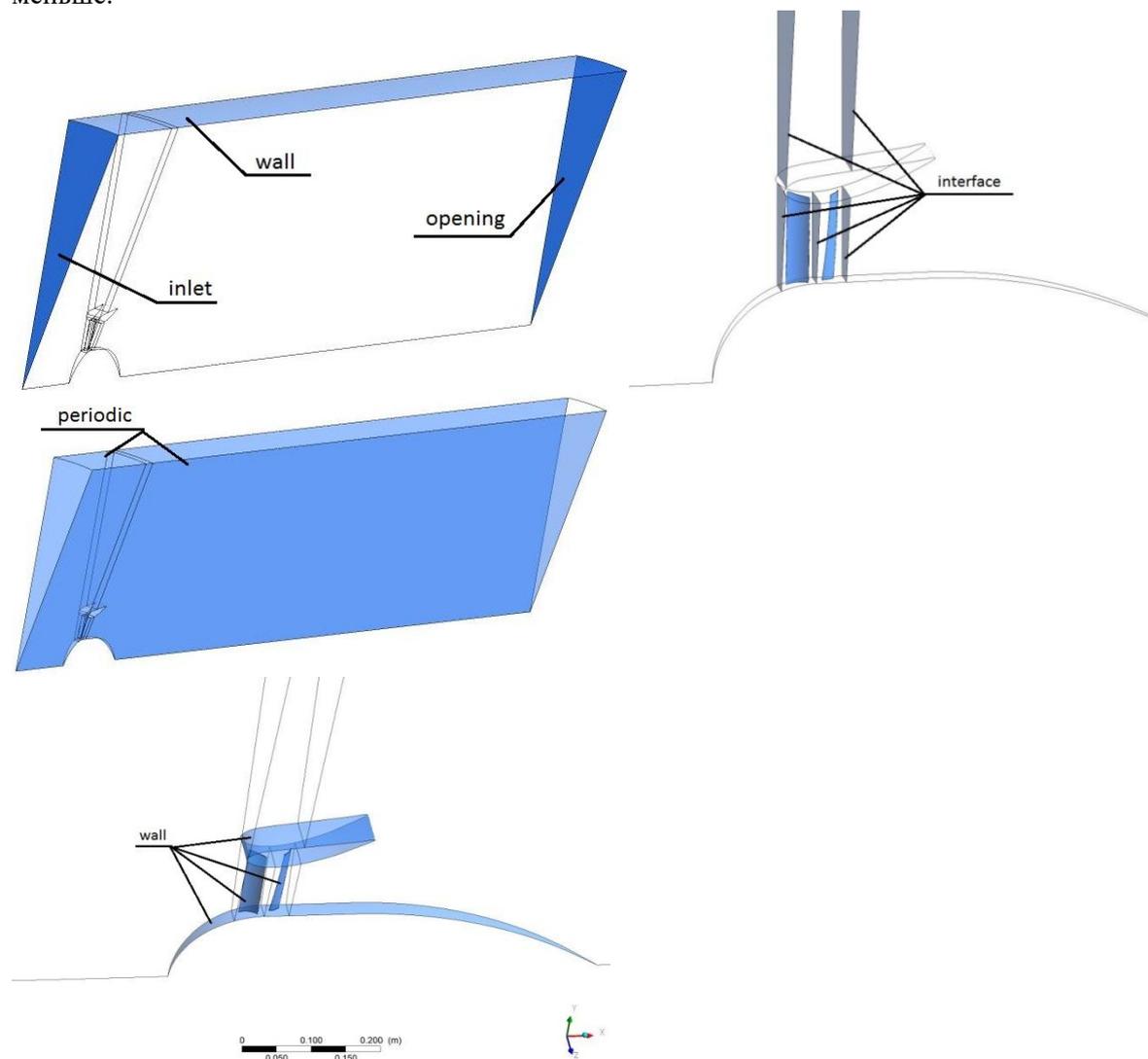


Рис. 9. Схема задания граничных условий.[2]

Численный эксперимент проводился при стационарной постановке задачи (Steady State). В качестве рабочей среды использовался идеальный газ (Air Ideal Gas). В закладке Heat Transfer (передача тепла) включалась опция Total Energy (полная энергия). На поверхности Inlet, через которую поток попадает в расчетную область, задавались значения скорости потока, соответствующие режиму работы диффузорного ветрогенератора, и полной 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 [2].

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

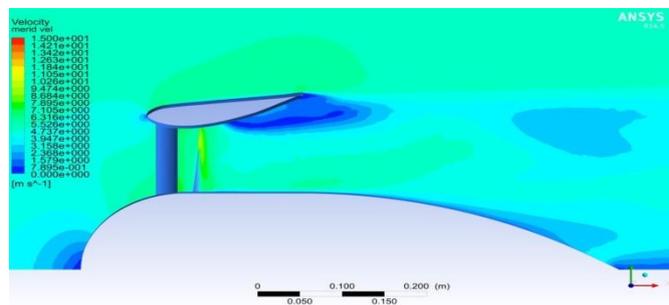
Для проведения численного эксперимента использовалась SST модель турбулентности, т.к. она является наиболее универсальной и разработана на основе базовых проверенных моделей k-ε и k-ω. Модель k-ε задавалась для нескольких режимов для сравнения полученных результатов с моделью SST.

Исходные данные для задания граничных условий, независимые от режима, для нормальных условий окружающей среды.

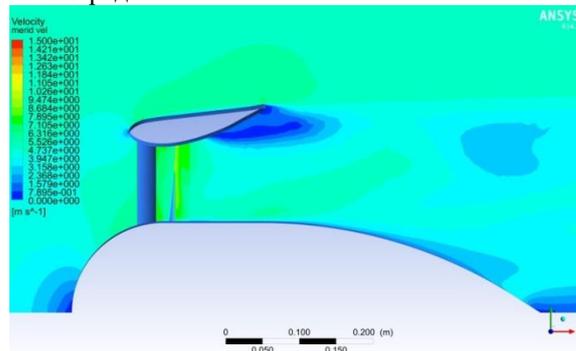
Исходные данные для задания граничных условий при различных режимах работы ветродвигателя с кольцевым крыловым диффузором выступали частота вращения ω, рад/с и скорость потока с, м/с.

По результат моделирования получены следующие картины течений в меридиональном сечении рис.10,11,12 и характеристики для одной конфигурации модели. Эксперимент как численный, так и натурный проводился для нескольких конфигураций моделей с разными профилями лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата. Сопоставление мощности, полученные по результатам расчета, и, полученные экспериментально при продувке в аэродинамической трубе диаметром 2 м для модели с 32 лопатками РК, представлены на рис. 10, 11, 12.

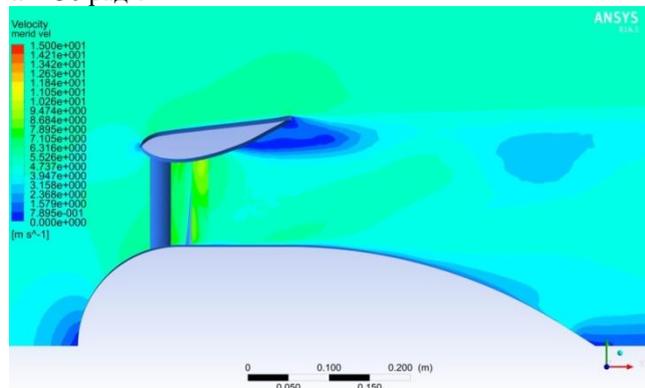
ω = 20 рад/с



ω = 25 рад/с



ω = 30 рад/с



ω = 35 рад/с

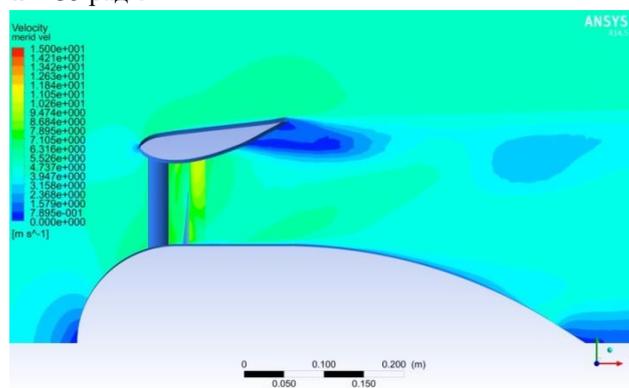


Рис. 10. Картины течений в меридиональном сечении с = 5 м/с, при разной нагрузке.

ω = 35 рад/с

ω = 45 рад/с

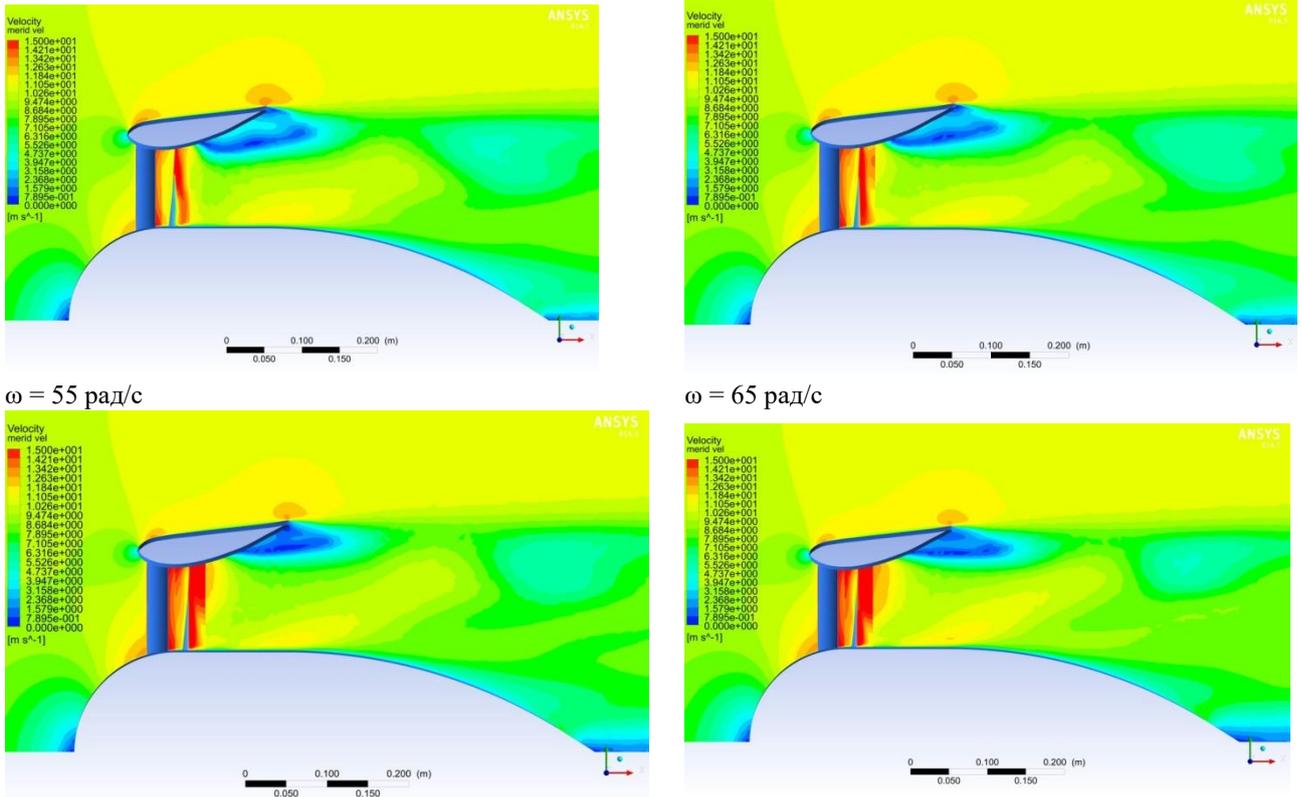


Рис. 11. Картины течений в меридиональном сечении $c = 10 \text{ м/с}$, при разной нагрузке.

$\omega = 65 \text{ рад/с}$

$\omega = 75 \text{ рад/с}$

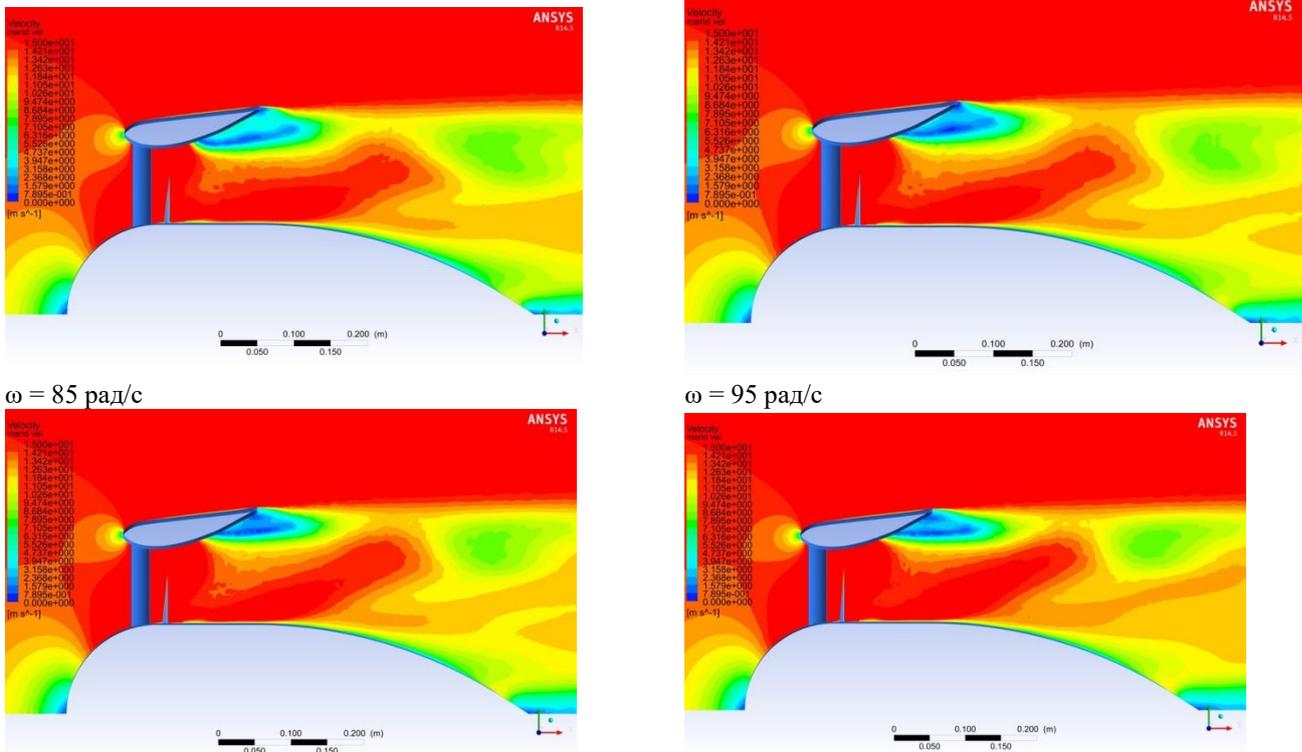


Рис. 12. Картины течений в меридиональном сечении $c = 1 \text{ м/с}$, при разной нагрузке.

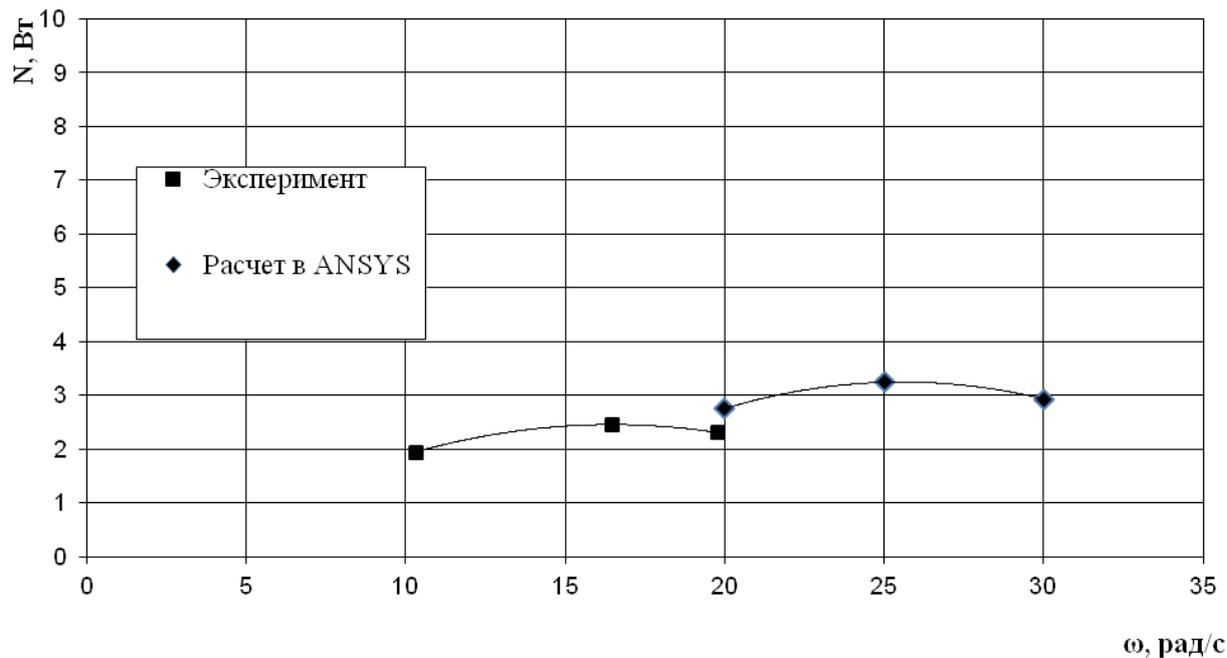


Рис. 13. Зависимость мощности ветрогенератора от частоты вращения при скорости потока на входе в расчетную область $c=5$ м/с[2]

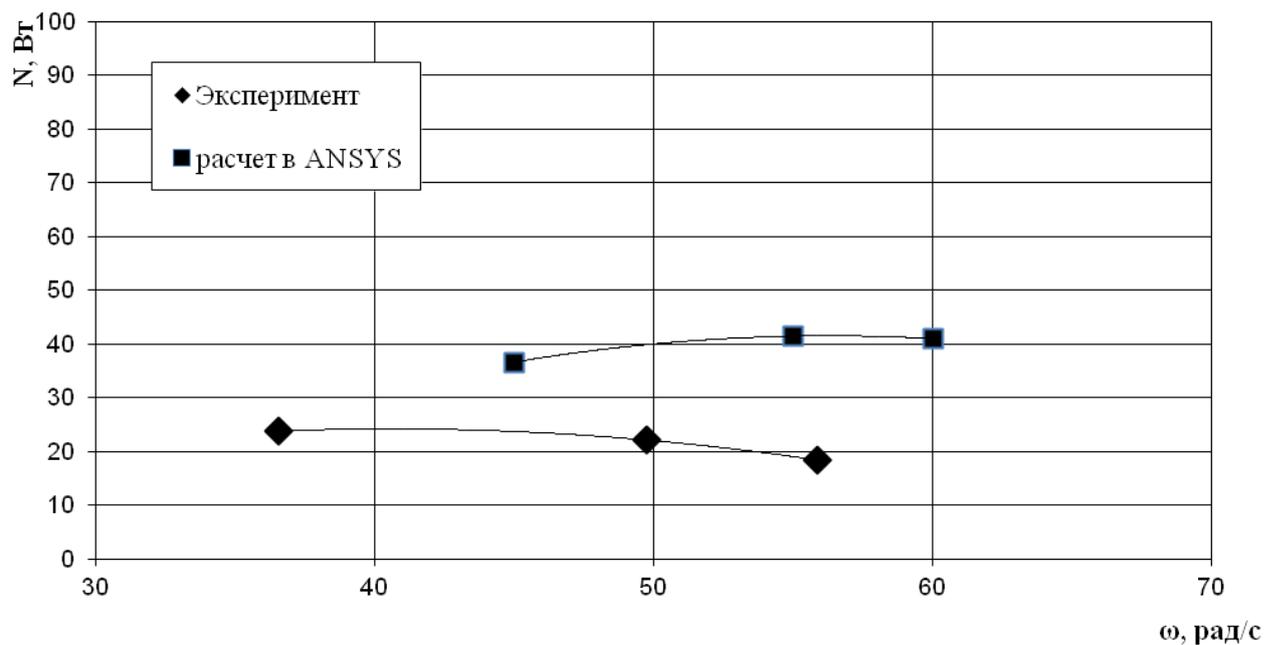


Рис. 14. Зависимость мощности ветрогенератора от частоты вращения при скорости потока на входе в расчетную область $c=10$ м/с[2]

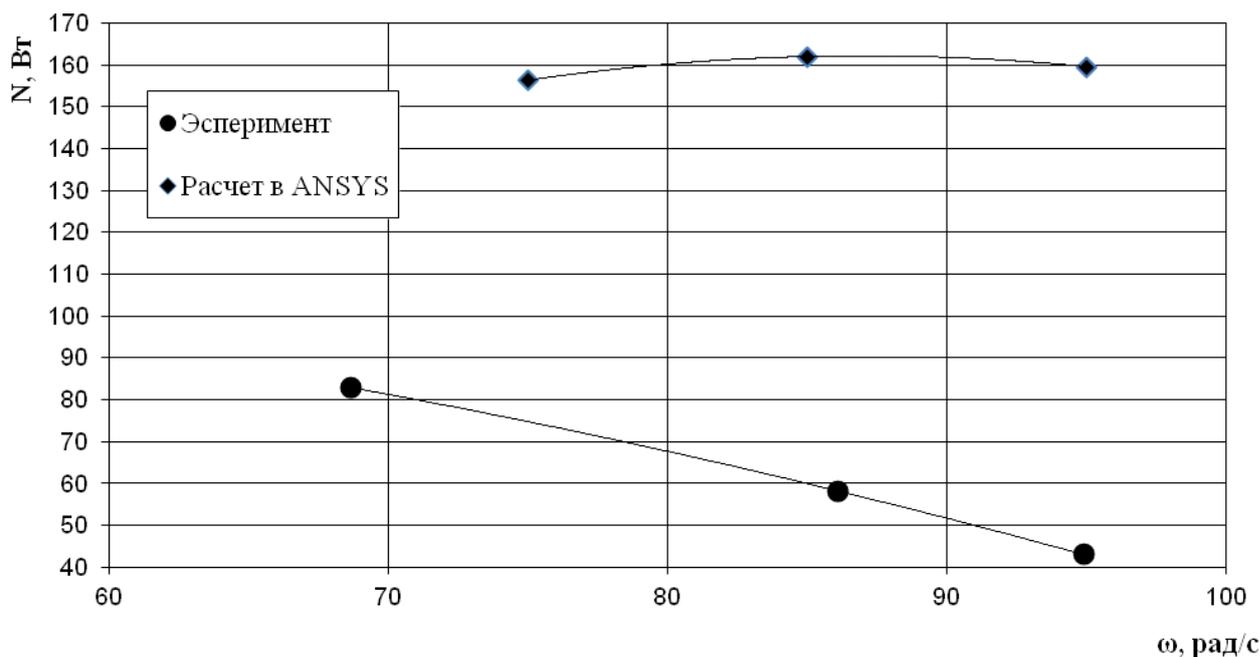


Рис. 15. Зависимость мощности ветрогенератора от частоты вращения при скорости потока на входе в расчетную область $c=15$ м/с[2]

Пример сравнения результатов расчета ветро турбины мощностью 2000Вт для разных сеток на супер компьютере

Расчет характеристики ветрогенератора затратный по времени процесс что видно из табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета на различных сетках одного режима

Тип области	2п	2п	2п	сектор	сектор	2п
Время расчета, мин	600	1140	840	44	220	420
Тип сетки	гексаэдр	гексаэдр	гексаэдр	тетраэдр	тетраэдр	тетраэдр
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

Вывод

Целью работы было доказать необходимость применения суперкомпьютеров для численного моделирования характеристик новых ветрогенераторов для избежания ошибок проектирования. Работа основывалась на реальных экспериментальных данных, что является важным для верификации расчетных методов[11]. Также можно отметить возможность визуализации и анализа потока при расчёте в ANSYS CFX, которые позволяют определить

участки отрыва и обратного течения при обтекании ветроустановки. Это позволяет значительно повысить качество элемента обтекаемой части, улучшить модель ветротурбины. В дальнейшем планируется применение других моделей турбулентности, размеров сетки, количества ячеек.

Литература

1. Гамбургер, Д. М. Численное моделирование течения вязкого газа в центробежной компрессорной ступени: методика и результаты / дис. канд. тех. наук. / Д. М. Гамбургер; СПбГПУ. – СПб., 2009.
2. Гилев К.О. Моделирование характеристик энергетической установки, состоящей из объемного компрессора, приводимого в действие диффузорным ветрогенератором, с варьированием количества лопаток проточной части . маг. раб.; напр. 13.03.03 - Энергетическое машиностроение, СПбПУ—СПб., 2015 .— 68 с.
3. ГОСТ Р 52302-2004, управляемость и устойчивость технические требования, методы испытаний.
4. де Рензо Д. Ветроэнергетика Москва. Энергоатомиздат 1982.
5. <http://www.inbitech.ru/ti/vetrogenerator/>
6. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки Москва 2006
7. Кожухов Ю.В., Трибунская К.С. Проведение численного эксперимента и анализ данных расчёта ступени осевого компрессора турбонаддува в программном комплексе ansys cfx. // [XLI Неделя науки СПбГПУ.: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III.] - СПб.: (Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 102 с.)
8. Кожухов Ю.В., Решетникова Л.В., Жалмурзиева Г.И.. Численный эксперимент в программном комплексе ansys cfx для рабочего колеса и безлопаточного диффузора модельной центробежной компрессорной ступени средней быстроходности. [XLI Неделя науки СПбГПУ.: материалы международной научно-практической конференции. Ч. III.] - СПб.: (Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 104 с)
9. Лебедев А.А., Лезов Г.К., Хорошев Е.Н., ред. д.т.н., проф. Р.А.Измайлова, к.ф.-м.н. С.Ю. Дудникова Отчет по I этапу работ гранта №11 фонда «Сколково», от 21.04.2011г (ООО «Оптифлейм Солюшенз»), Спб .
10. Хорлокк, Дж. Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика) / Дж. Х. Хорлокк; Машиностроение, 1972. – 212 с.
11. Экспертное заключение, данное ФГУП ЦАГИ от 9.04.2012 г на отчет ООО «Оптифлейм солюшенз» по I этапу работ гранта №11
12. ANSYS CFX 14.5: User's Manual [Электронный ресурс] / ANSYS Inc., 2014. <http://www.ansys.com>
13. 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] 08/2015; London (Volume 90(1):012047. DOI:10.1088/1757-899X/90/1/012046)
14. Izmaylov R., Lebedev A. Centrifugal compressor surge detecting method based on wavelet analysis of unsteady pressure fluctuations in typical stages; (2015) [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering], London 2-s2.0-84941243565
15. 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 13th ISUAAAT], (Tokyo, Japan) ISUAAAT 13-S7-1
16. 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 2011] (Areas26- 28 October 2011, Łódź 140)

Audit of wind turbine characteristics using CFD simulation on a supercomputer.

Y. Kozhukhov , A. Lebedev, A. Danilishin, E. Davletgareev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute for Energy and Transport Systems

The goal of this work was to prove the need for supercomputing for numerical simulation of the characteristics of the new wind turbines to avoid design errors. The work was based on real experimental data, which is important for the verification of calculation methods. You can also mention the possibility of visualizing and analyzing the flow in the calculation in ANSYS CFX, which allow to determine the areas of separation and reverse flow over wind turbines. This can significantly improve the quality of the item streamlined, improved wind turbine model. In the future we plan to use other turbulence models, mesh size, number of cells.