

# Моделирование, расчет постоянных и переменных нагрузок на ветрогенератор

Выполнил: Львов М.С., гр.5040103/10301

Руководитель: Мешков В.Р.

Ассисент: Киюц А.В.



# Актуальность

Возобновляемые источники электроэнергии в последние годы чаще применяются в промышленности на фоне угасающих невозобновляемых источников.

Ветроэнергетика сегодня проигрывает тепловой (ТЭС), атомной (АЭС) и солнечной электростанциям (СЭС) только по высокой стоимости капиталовложений, однако расходы на ее эксплуатацию и ремонт значительно ниже других. Если подсчитать все расходы ТЭС и АЭС с учетом скрытых, которые, как правило, не включают в цену электроэнергии, например, затраты, связанные с загрязнением окружающей среды, то ветроэлектростанции безусловно выигрывают.



# Постановка задачи

Чтобы максимально использовать силу ветра, ученые разработали различные формы лопастей — поверхность одной закруглена, а поверхность другой – плоская. Это позволяет увеличить скорость ветра и направить поток воздуха на другую лопасть.

Моя работа посвящена моделированию, расчету постоянных и переменных нагрузок на ветрогенератор и его лопасти от потока ветра. Будет рассмотрен ветрогенератор с горизонтальной осью, рассчитаны ветровые нагрузки на его лопасти, башню, корпус и основание, улучшен угол постановки лопасти в роторе с целью максимизации крутящего момента.



# Цели и задачи

1. Построение твердотельной трехмерной модели составных частей
2. Расчёт ветровых нагрузок при неподвижном ротором на средних и максимальных скоростях ветра
3. Расчёт момента вращения ротора на минимальных, средних и максимальных скоростях ветра
4. Подбор оптимального угла постановки лопастей с целью увеличения возможного момента вращения ротора
5. Сравнение нагрузок и момента вращения до и после оптимизации

Как результат - показать улучшения после оптимизации угла постановки лопасти в колпаке ротора.



# Существующие подходы

На данный момент существует ряд работ, описывающий оптимальную геометрию лопастей в плане максимальной аэродинамической эффективности, производства энергии и минимальной силы тяги.

Существует много работ, в которых исследуется и рассчитывается возможность применения ветрогенераторов в отдельных регионах. В них используются географические данные скорости ветра, исследуются наилучшие места для установки ветрогенераторов и рассчитываются теоретические результаты от их применения.

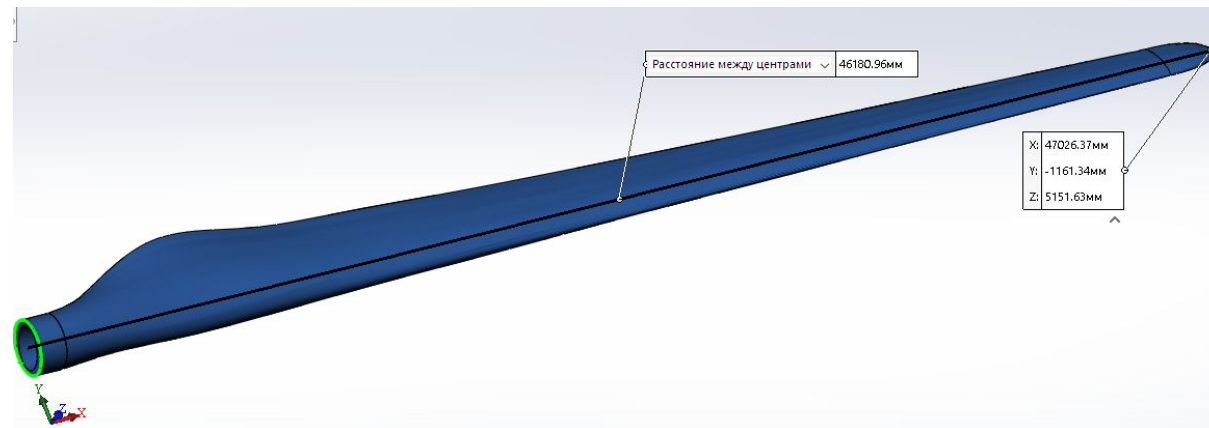
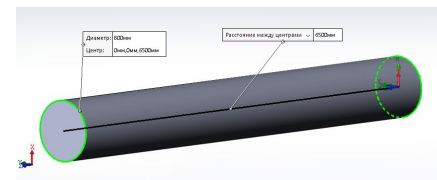
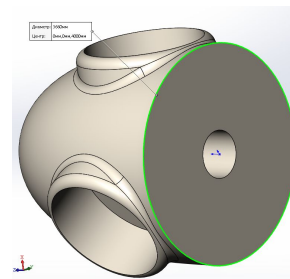
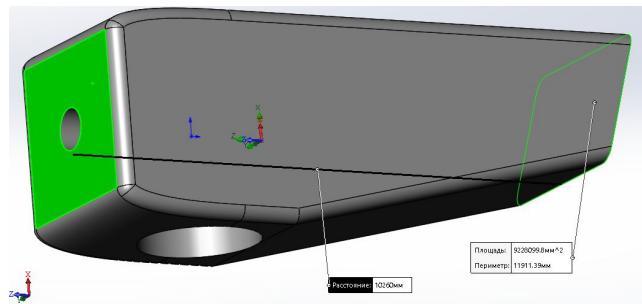
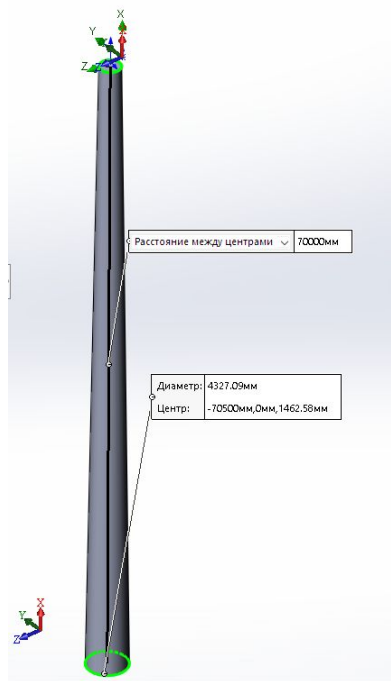
# Проделанные работы

За первоначальный вариант была взята модель ветрогенератора из общедоступного источника. По этой модели восстановлена параметрическая модель в САПР SolidWorks.

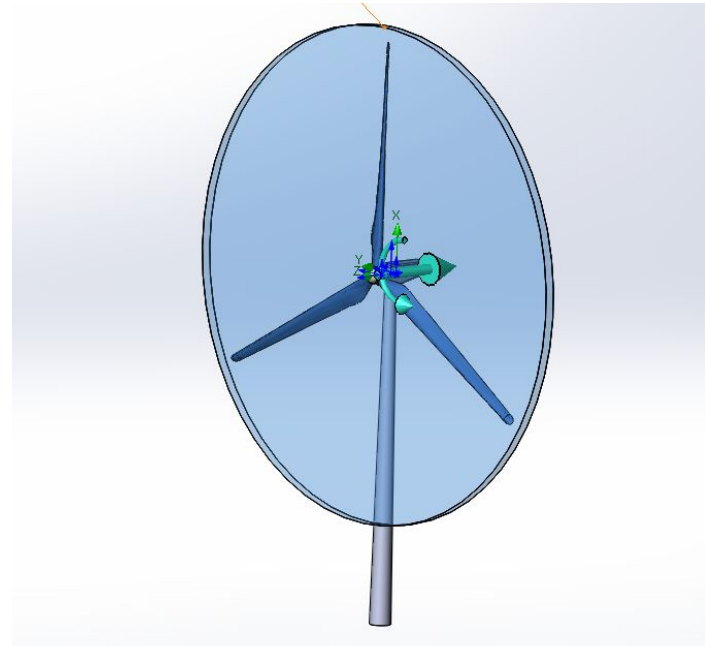
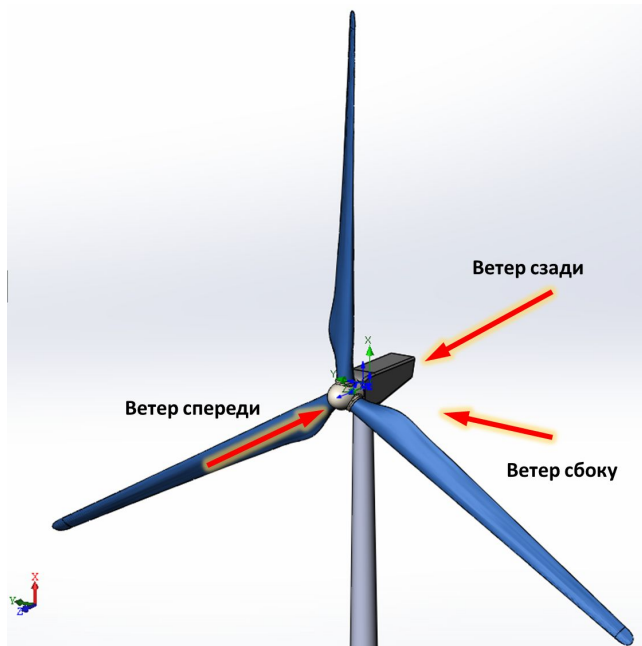
Модель ветрогенератора построена в натуральную величину, состоит из деталей: мачта, гондола, колпак ротора, ротор, лопасть. Лопасть пустотелая, заданной толщины, построена по сечениям. Длина лопасти 46 м. Высота мачты 70м.



# Составные части модели

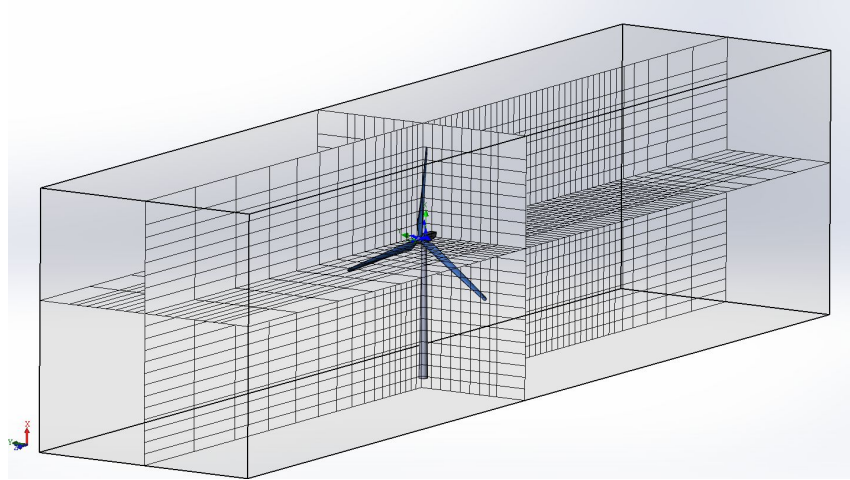


# Расчет нагрузок в SolidWorks Flow Simulation





# Статический расчет нагрузок



Первый расчет - к неподвижной модели ветрогенератора рассчитываю нагрузку на одну лопасть, на весь пропеллер, гондолу и мачту с целью определения ветровых нагрузок на эти элементы. Направление ветра разное: спереди, сбоку по 90 градусов, сзади. Величина ветра - с средним (5.8 м/с) и максимальным (30 м/с) значением в заданном регионе.

Для расчета ветрогенератора создана расчетная область в Solidworks FlowSimulation. Построена сетка и задан ветер с разной скоростью.

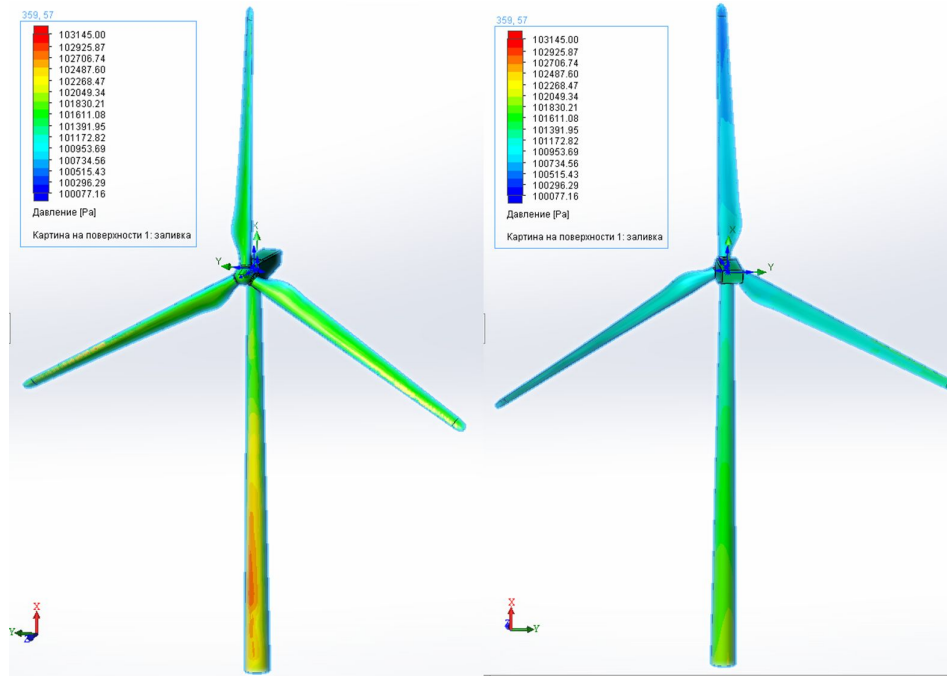


# Статический расчет нагрузок

В результате численного моделирования получены результаты:

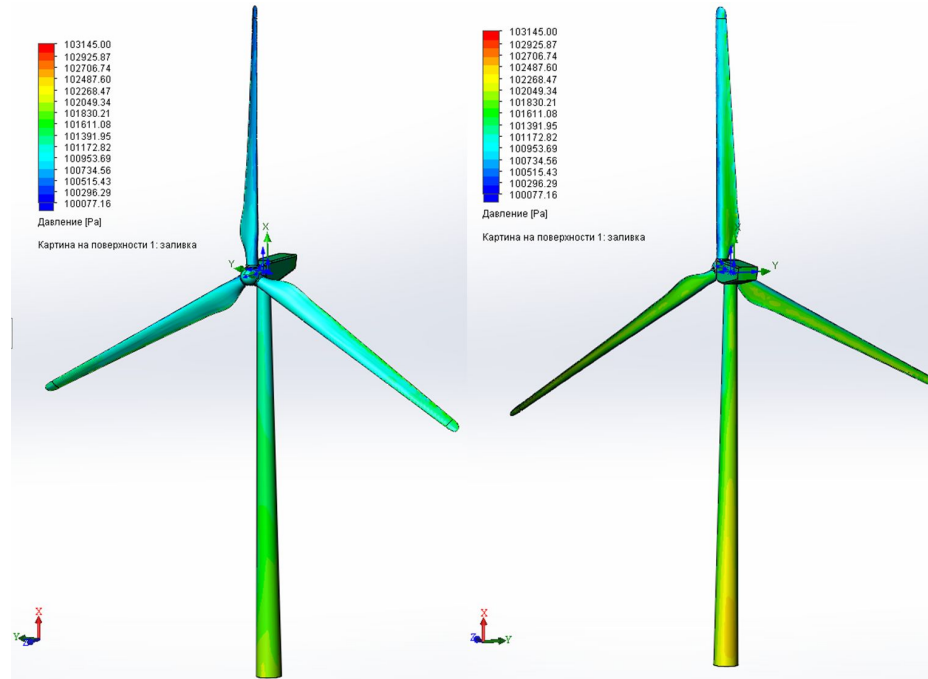
- Параметры скорости и давления потока во всех сечениях расчетной области
- Параметры давления на поверхностях деталей модели
- Траектория движения потока воздуха
- Значения крутящего момента и давления на модель

# Результаты статического расчета



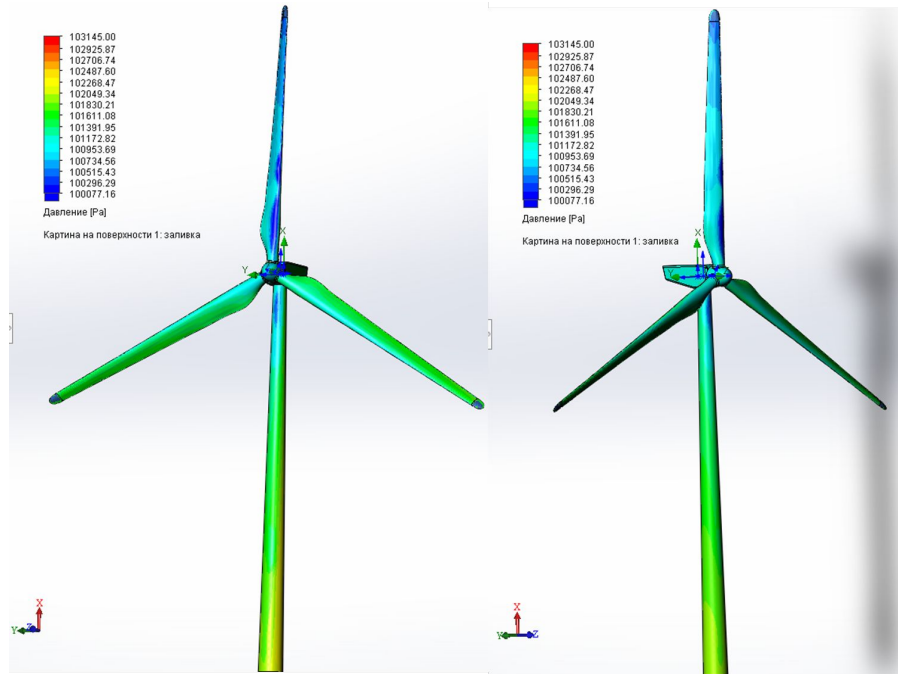
Давление на поверхностях деталей для максимального потока ветра и направления спереди

# Результаты статического расчета



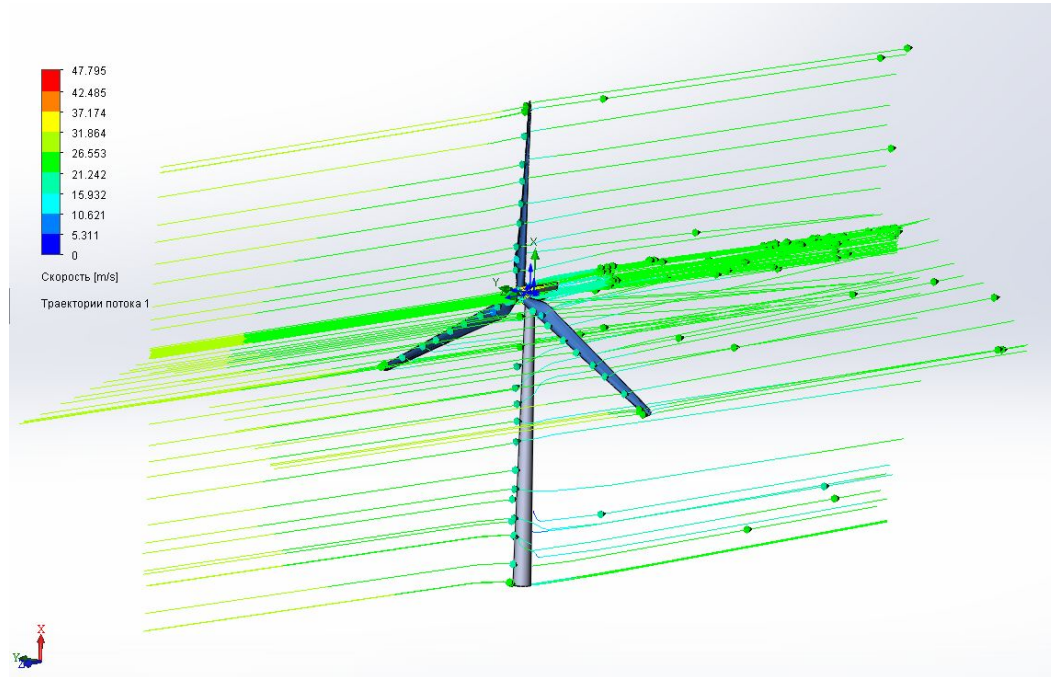
Давление на поверхностях деталей для максимального потока ветра и направления сзади

# Результаты статического расчета



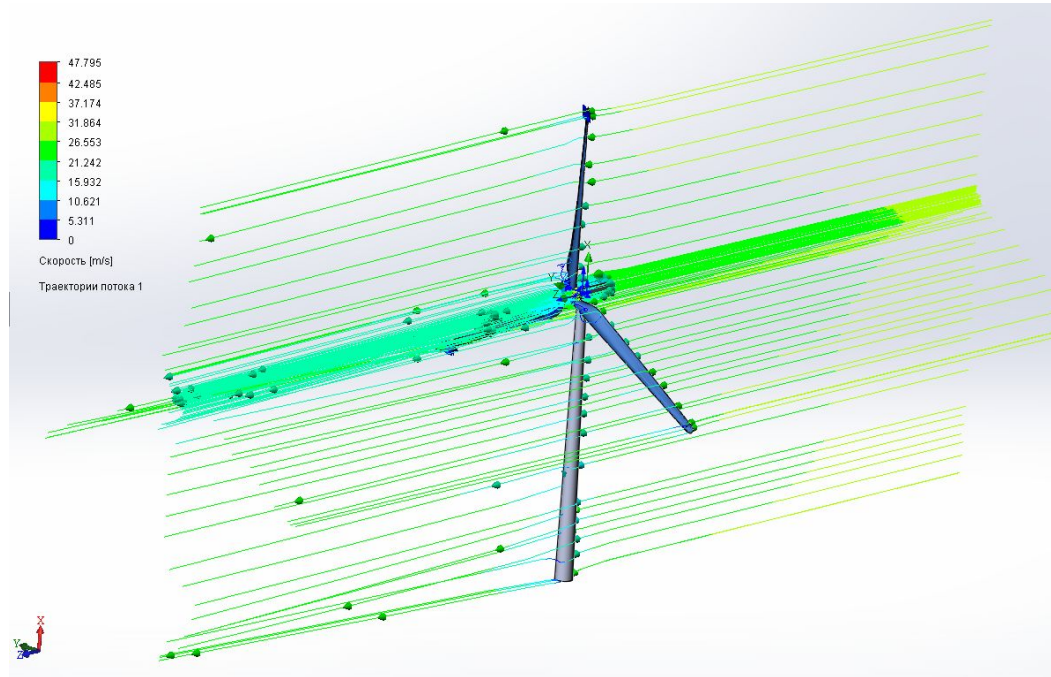
Давление на поверхностях деталей для максимального потока ветра и направления сбоку

# Результаты статического расчета



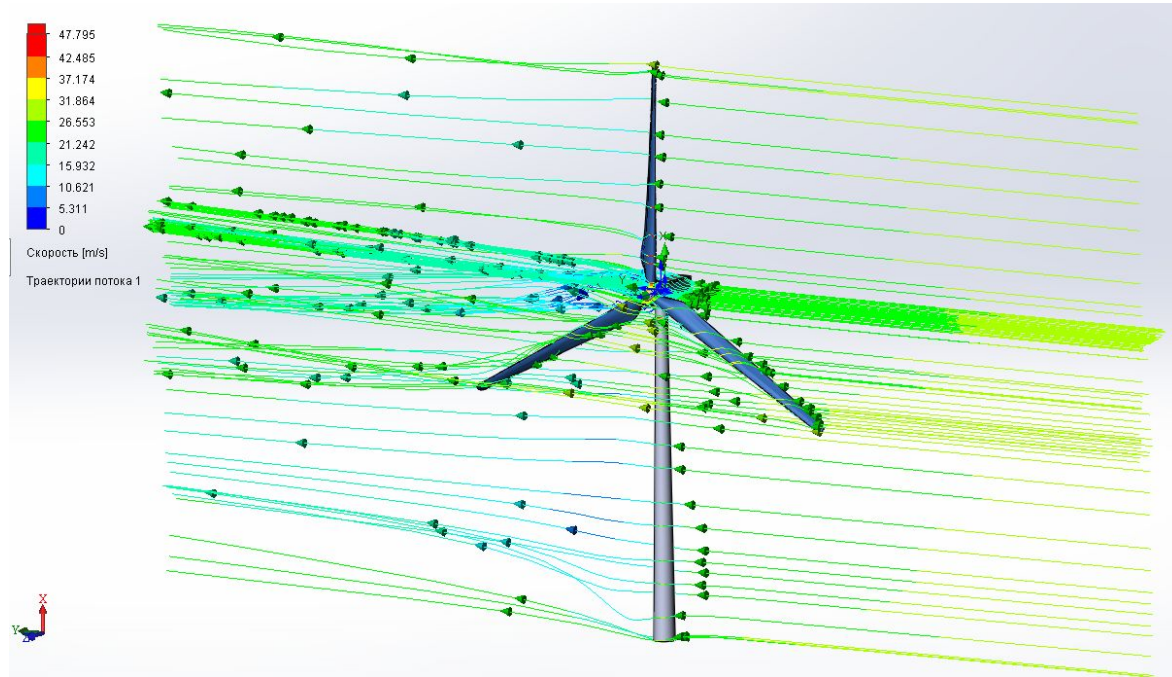
Траектория движения потока прямо с градиентом по скорости

# Результаты статического расчета



Траектория движения потока сзади с градиентом по скорости

# Результаты статического расчета



Траектория движения потока сбоку с градиентом по скорости



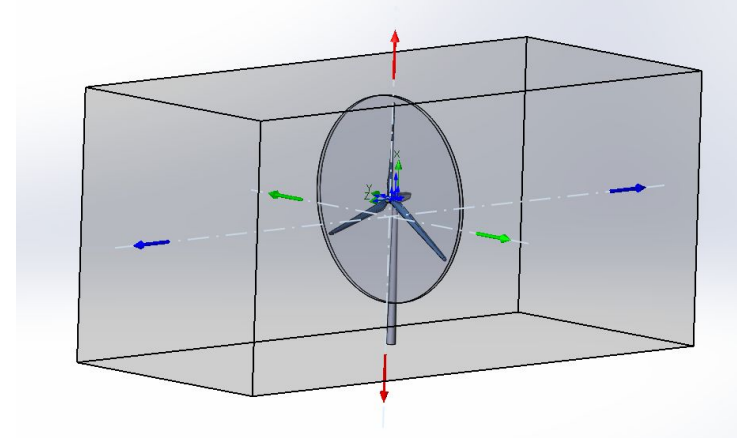
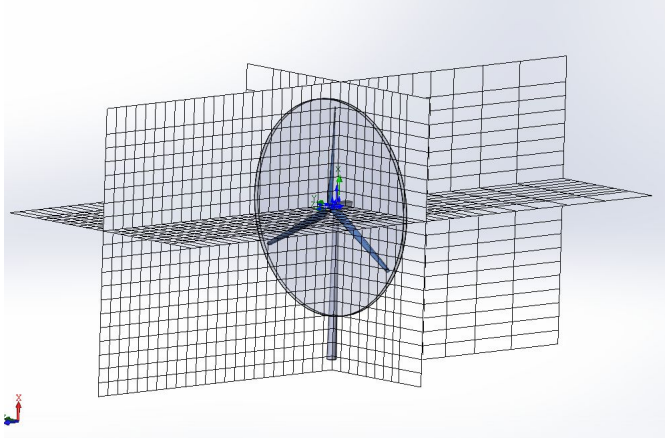


# Результаты статического расчета

Наименование	Нагрузка на лопасть, Н	Нагрузка на гондолу, Н	Нагрузка на мачту, Н	Крутящий момент на лопастях и роторе, Н*м
Максимальная скорость спереди	<b>72228</b>	3256	<b>177980</b>	79597
Максимальная скорость сзади	63670	<b>7019</b>	83679	160420
Максимальная скорость сбоку	15723	2064	6289	<b>29251</b>
Средняя скорость спереди	3324	156	8143	3750
Средняя скорость сзади	2962	337	3873	7424
Средняя скорость сбоку	707	88	617	1384

В результате расчета получены значения сил на поверхности конструкции и крутящего момента на ветрогенератор. Результирующие силы на детали снимаются с модели по направлению движения ветра, а крутящий момент относительно оси вращения ветрогенератора.

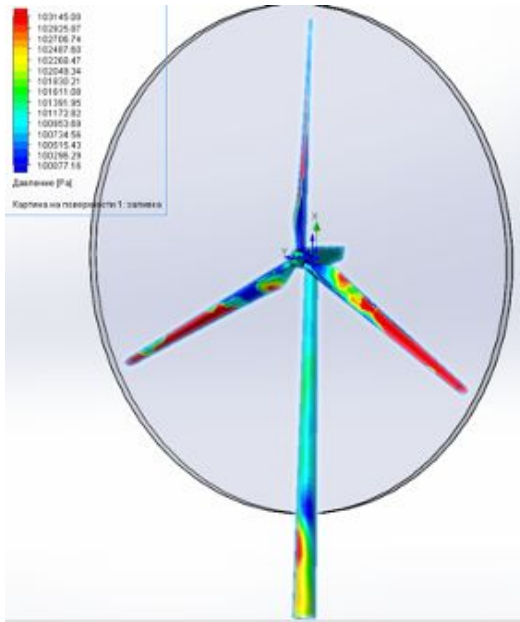
# Динамический расчет нагрузок



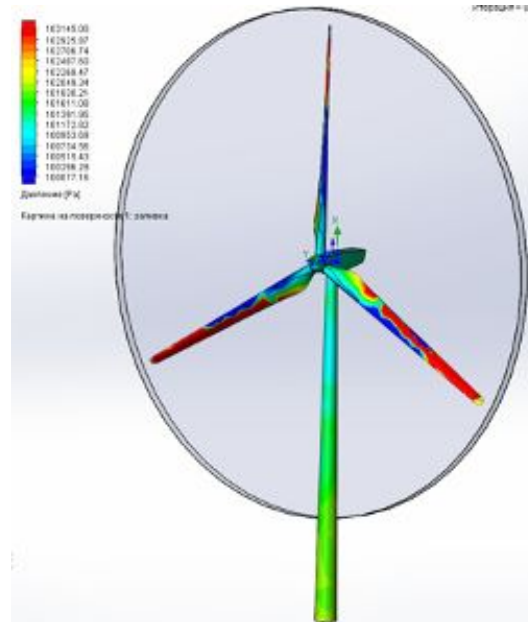
Моделируется ситуация, в которой вращающиеся лопасти подвергаются нагрузке ветра с разных сторон. В расчете рассматривается максимальная и средняя скорость набегающего ветра – 27 м/с и 5.8 м/с соответственно. Максимальная скорость вращения лопастей – 4 рад/с, средняя – 3 рад/с, минимальная – 1 рад/с.

Для расчета ветрогенератора создана расчетная область в Solidworks FlowSimulation. Построена сетка и задан ветер с разной скоростью.

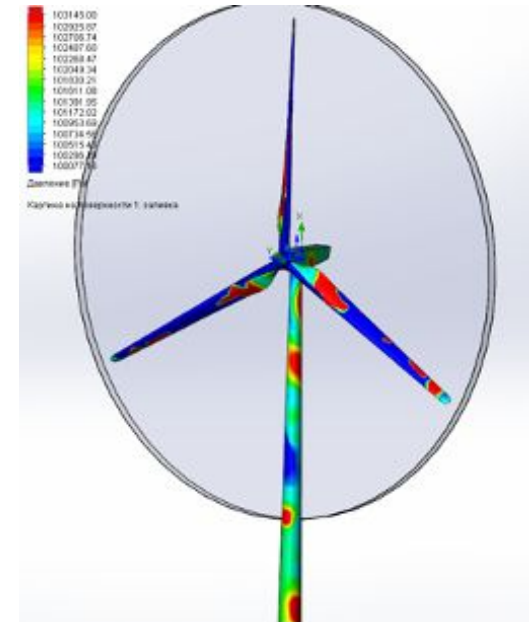
# Результаты динамического расчета



а)



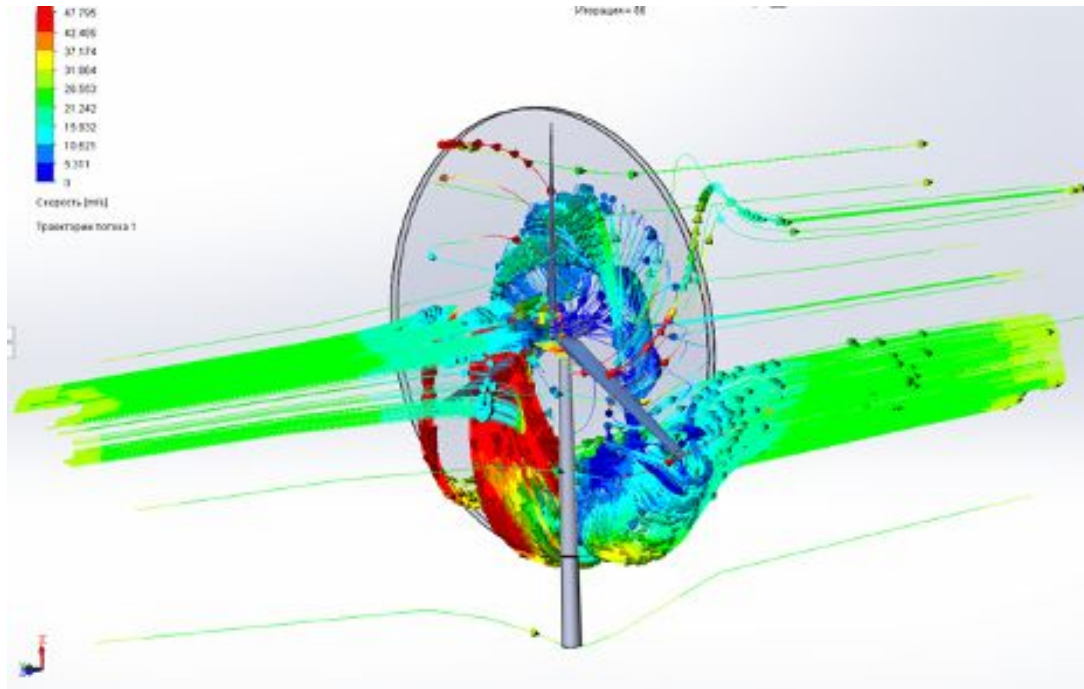
б)



в)

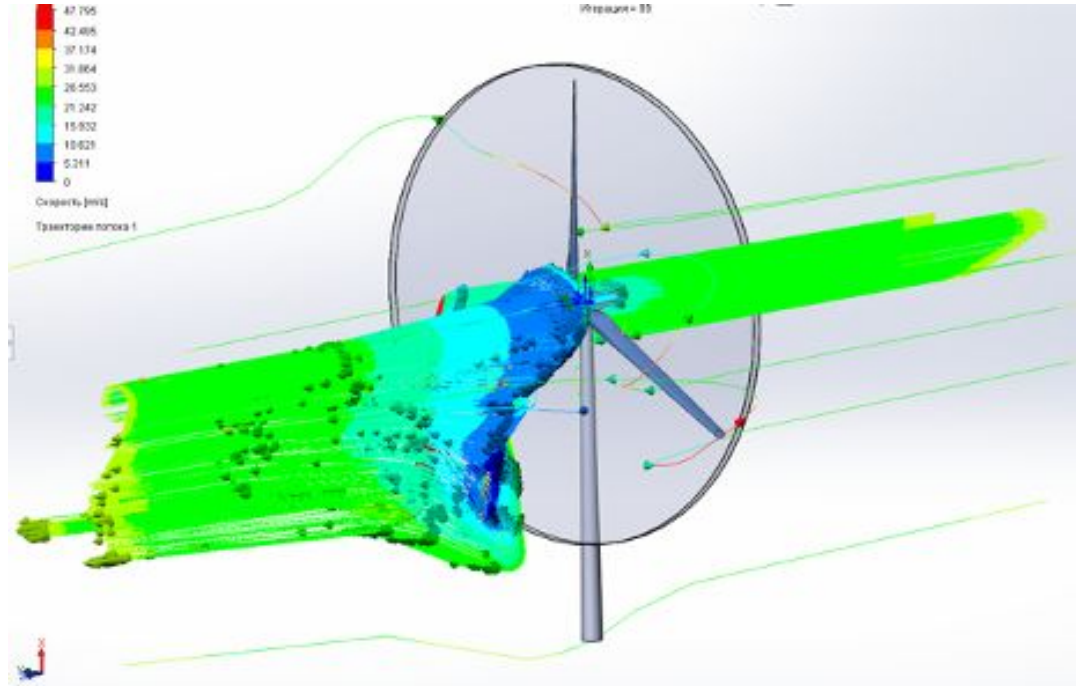
Давление на поверхностях для максимального потока ветра и направления: а) спереди б) сзади в) сбоку

# Результаты динамического расчета



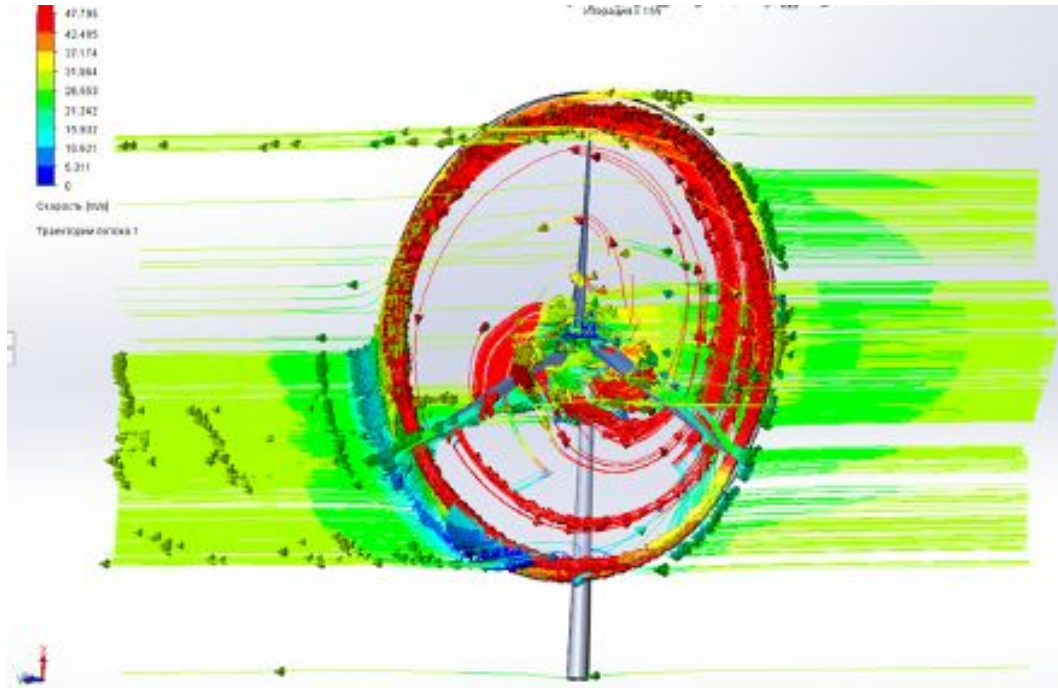
Траектория движения потока прямо с градиентом по скорости

# Результаты динамического расчета



Траектория движения потока сзади с градиентом по скорости

# Результаты динамического расчета



Траектория движения потока сбоку с градиентом по скорости

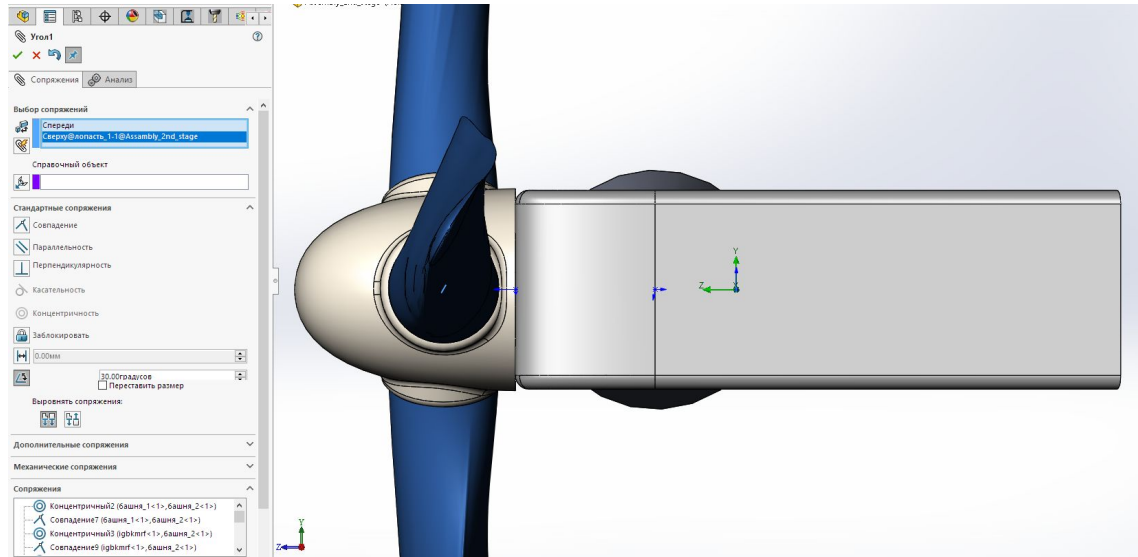


## Результаты динамического расчета

Наименование	Нагрузка на лопасть, Н	Нагрузка на гондолу, Н	Нагрузка на мачту, Н	Крутящий момент на лопастях и роторе, Н*м
Максимальная скорость спереди	77374.5	5048.4	418804.2	444935
Средняя скорость спереди	30888.8	1184.2	27702.1	366427
Минимальная скорость спереди	22019.2	841.5	6922.0	343145

В результате расчета получены значения сил на поверхности конструкции и крутящего момента на ветрогенератор. Результирующие силы на детали снимаются с модели по направлению движения ветра, а крутящий момент относительно оси вращения ветрогенератора.

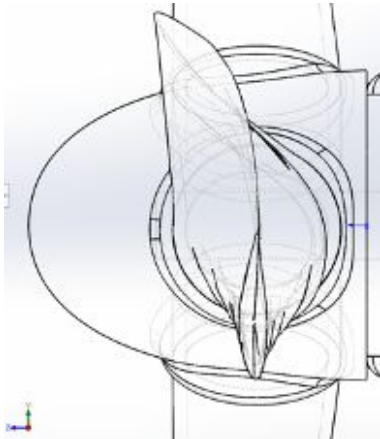
# Оптимизация угла постановки лопасти



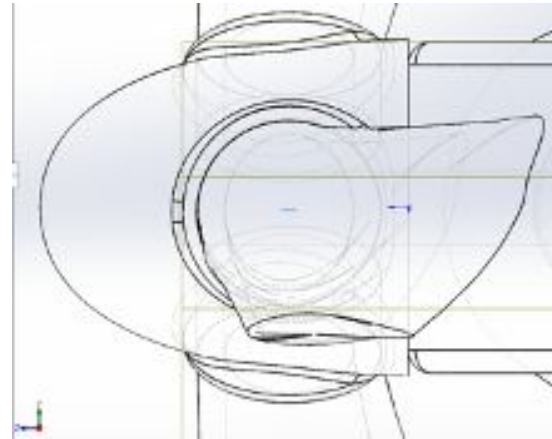
В данном расчете проводится подбор оптимального угла установки лопасти для достижения максимального крутящего момента на лопасти ветрогенератора. Угол установки лопастей задается как угол между видом “Спереди” глобальной системы координат и видом “Сверху” локальной системы координат лопасти.



# Оптимизация угла постановки лопасти



а)

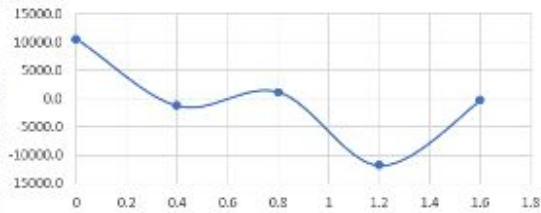


б)

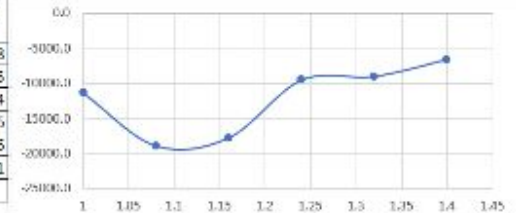
Угол установки лопасти (0 (а) и 1.6 (б) радиан) в Solidworks FlowSimulation.

# Оптимизация угла постановки лопасти

Угол установки лопасти, радиан	Крутящий момент на лопастях, Н*м
0	10448.4
0.4	1286.5
0.8	1131.4
1.2	-11772.1
1.6	-279.1

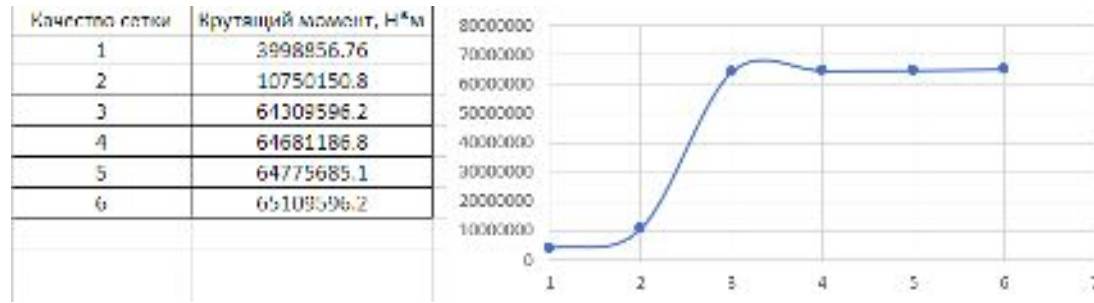


Угол установки лопасти, радиан	Крутящий момент на лопастях, Н*м
1	-11355.8
1.08	-18905.5
1.16	-17747.4
1.24	-9529.6
1.32	-9006.6
1.4	-6568.1



Результаты расчета крутящего момента в Solidworks FlowSimulation в первом и втором приближении. Выбираем оптимальный угол установки лопастей 1,08 радиан (62 градуса), при котором на заданном режиме работы ветрогенератора получается максимальный крутящий момент на лопастях.

# Оптимизация угла постановки лопасти



Проведена проверка сеточной сходимости результатов расчета крутящего момента на лопастях ветрогенератора. На рисунке 36 показаны результаты расчетов с разным качеством сетки. Видно, что при качестве сетки 3 результат отличается от последующего на 1%. Для дальнейших расчетов используется качество сетки со значением 3.



# Результаты статического расчета

Наименование	Нагрузка на лопасть, Н	Нагрузка на гондолу, Н	Нагрузка на мачту, Н	Крутящий момент на лопастях и роторе, Н*м
Максимальная скорость спереди	<b>77426</b>	4457	<b>210600</b>	101035
Максимальная скорость сзади	64400	<b>6423</b>	108995	<b>261478</b>
Максимальная скорость сбоку	354	252	37425	6647
Средняя скорость спереди	3658	218	22520	4826
Средняя скорость сзади	2948	294	38019	12053
Средняя скорость сбоку	66	30	3672	570

В таблицах представлены результаты статического расчета для угла установки лопастей 62 градуса.



# Результаты динамического расчета

Наименование	Нагрузка на лопасть, Н	Нагрузка на гондолу, Н	Нагрузка на мачту, Н	Крутящий момент на лопастях и роторе, Н*м
Максимальная скорость спереди	9442.1	36.4	121700.8	508456
Средняя скорость спереди	27772.7	5198.3	74531.3	408681
Минимальная скорость спереди	25782.4	4822.6	59493.7	368249

В таблицах представлены результаты динамического расчета для угла установки лопастей 62 градуса.

# Сравнение результатов статического расчета

Наименование	Изменение нагрузки на лопасть, %	Изменение нагрузки на гондолу, %	Изменение нагрузки на мачту, %	Изменение крутящего момента на лопастях и роторе, %
Максимальная скорость спереди	7.2	36.9	18.3	26.9
Максимальная скорость сзади	1.1	-8.5	30.3	63.0
Максимальная скорость сбоку	-97.8	-87.8	495.1	-77.3
Средняя скорость спереди	10.1	39.8	-376.6	28.7
Средняя скорость сзади	-0.5	-12.6	881.6	62.4
Средняя скорость сбоку	-90.7	-133.5	584.0	-58.8

В таблицах представлено сравнение результатов статического и динамического расчетов для угла установки лопастей 45 градусов и оптимизированного угла 62 градуса.



# Сравнение результатов динамического расчета

Наименование	Изменение нагрузки на лопасть, %	Изменение нагрузки на гондолу, %	Изменение нагрузки на мачту, %	Изменение крутящего момента на лопастях и роторе, %
Максимальная скорость	-87.8	-99.3	-70.9	14.3
Средняя скорость	17.1	473.1	-314.8	11.5
Минимальная скорость	-10.1	339.0	-1176.7	7.3

Сравнение результатов показывает, что при изменении угла установки лопастей ветрогенератора на элементы конструкции нагрузка кратно уменьшается или увеличивается.

# Сравнение с реальным ветрогенератором

Для сравнения выбран ветрогенератор Siemens SWT-2.3-93 [18], технические характеристики представлены в таблице.

Мощность, кВт	2300
Номинальная скорость ветра, м/с	14
Скорость ветра критическая, м/с	55
Диаметр ротора, м	93
Площадь <u>заптегания</u> , м <sup>2</sup>	6800
Количество <u>лопастей</u>	3
Частота вращения, об/мин	16

$$N = M \cdot \omega = \frac{408687 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 19 \frac{\text{об}}{\text{МИН}}}{60 \text{ с}} = 813 \text{ кВт};$$





# Сравнение задач и результатов

Все задачи выполнены.

1. Построена модель из составных частей
2. Прделан расчёт ветровых нагрузок при неподвижным ротором на средних и максимальных скоростях ветра
3. Прделан расчёт момента вращения ротора на минимальных, средних и максимальных скоростях ветра
4. Подобран оптимального угла постановки лопастей с целью увеличения возможного момента вращения ротора
5. Прведено сравнение нагрузок и момента вращения до и после оптимизации

Получено увеличение крутящего момента после оптимизации угла постановки лопасти в колпаке ротора.



# Выводы

Проведены статические и динамические расчеты на ветрогенератор, оптимизирован угол постановки лопасти в колпаке ротора, благодаря чему увеличен крутящий момент в среднем на 10%.

**Спасибо за внимание!**

# Ответы на вопросы

Начальные условия стенок ветрогенератора и рабочего тела для расчета представлены ниже:

Тип задачи

Внутренняя

Внешняя

Учитывать замкнутые полости

Исключить полости без условий течения

Исключить внутреннее пространство

Навигатор

- Тип задачи
- Текучая среда
- Условия на стенках
- Начальные и внешние условия

Физические модели	Значение
Теплопроводность в твердых телах	<input type="checkbox"/>
Радиационный теплообмен	<input type="checkbox"/>
Нестационарность	<input type="checkbox"/>
Гравитация	<input checked="" type="checkbox"/>
... X компонента	-8.81 m/s <sup>2</sup>
... Y компонента	0 m/s <sup>2</sup>
... Z компонента	0 m/s <sup>2</sup>
Вращение	<input checked="" type="checkbox"/>
... Тип	Локальная область (m) (Averaging)

Текучая среда

Пути

Новый...

Навигатор

- Тип задачи
- Текучая среда
- Условия на стенках
- Начальные и внешние условия

Характеристика течения	Значение
Тип течения	Ламинарное и турбулентное
Влажность	<input checked="" type="checkbox"/>

Параметр	Значение
Тепловое условие на стенке по умолчанию	Адиабатическая стенка
Шероховатость	0 micrometer

Навигатор

- Тип задачи
- Текучая среда
- Условия на стенках
- Начальные и внешние условия

Параметр	Значение
Задание параметров	Заданы пользователем
Термодинамические параметры	
... Давление	101325 Pa
... Потенциал давления	<input checked="" type="checkbox"/>
... Привязка к начальной точке	<input type="checkbox"/>
... Температура	293.2 K
Параметры скорости	
Параметры турбулентности	
... Параметры	Интенсивность и масштаб турбулентности
... Интенсивность турбулентности	0.1 %
... Масштаб турбулентности	0.1497 m
Влажность	
... Относительная влажность	80 %
... Характерное давление	101325 Pa
... Характерная температура	293.2 K

Навигатор

- Тип задачи
- Текучая среда
- Условия на стенках
- Начальные и внешние условия

# Ответы на вопросы

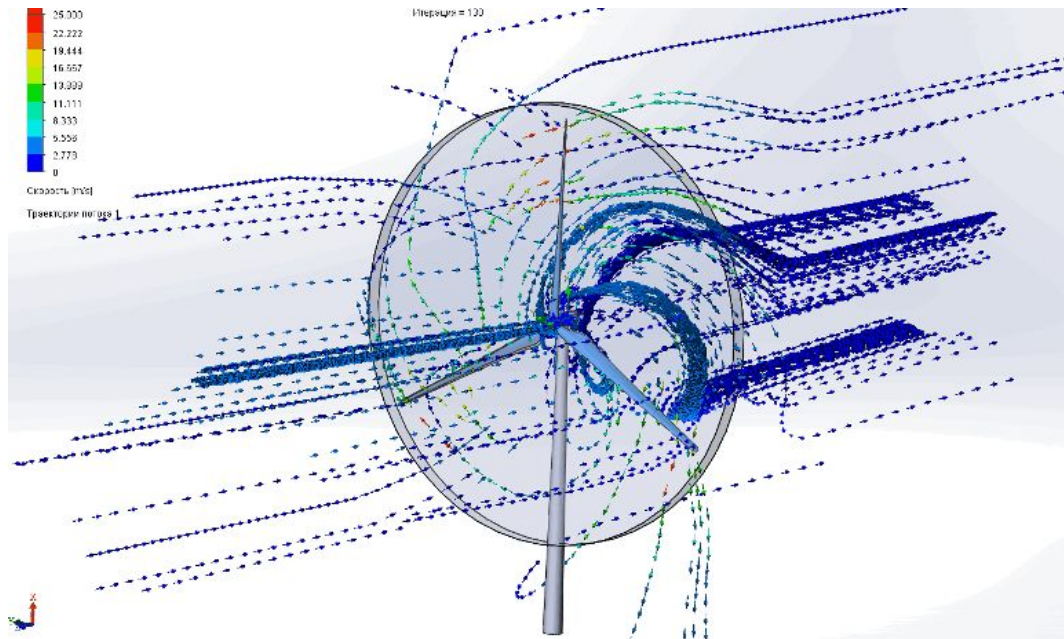
В представленных расчетах рабочая область в поперечном направлении составляет 2 диаметра рабочего колеса ветрогенератора, а в продольном – 4 диаметра рабочего колеса ветрогенератора.

Размер рабочей области установлен из соображений необходимости определения воздействия потока на лопасти. Параметры возмущенного потока в областях удаленных от рабочего колеса ветрогенератора не рассматриваются.

При расчете обтекания профиля свободным потоком расчетная область представляла собой сочетание прямоугольника и полуокружности, в центре которой располагалась исследуемая модель (рис. 2). В этом случае линейные размеры расчетной области в продольном направлении составляют 22,5 хорды профиля, а в поперечном направлении — 15. Количество расчетных ячеек составляло 89000. На левой, нижней и верхней границах задавалось значение скорости, равное скорости на выходе из сопла, на правой границе задавалось условие сохранения массового расхода.

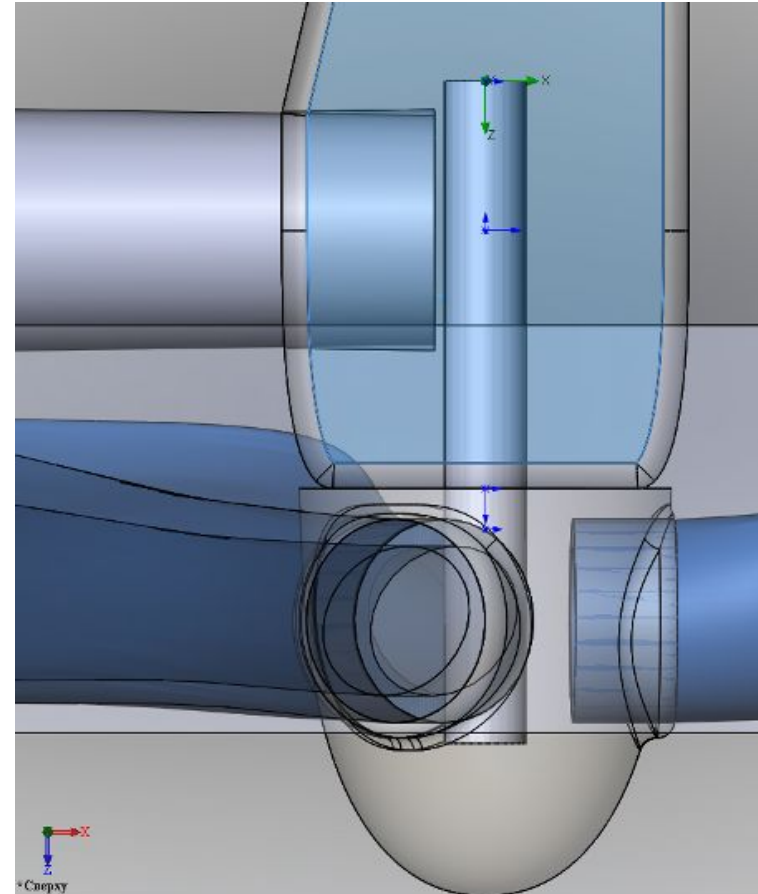
# Ответы на вопросы

Изображения в отчете представлены для установившегося потока воздуха с постоянными параметрами. Ниже представлена анимация течения рабочего тела через ветрогенератор.



# Ответы на вопросы

Ротор в сборке обеспечивает механическую связь между колпаком и гондолой. Связь между колпаком и гондолой отсутствует. На воздушные потоки ротор влияния не оказывает.





# Ответы на вопросы

Характеристики сетки и затрат времени при расчете модели при оптимальной размерности сетки

The screenshot displays two windows from a software application. The left window, titled 'Текущая информация' (Current Information), shows a table of parameters and their values. The right window, titled 'События' (Events), shows a log of events with columns for the event name, iteration number, and time.

Параметр	Значение
Статус	Расчет завершен.
Все ячейки	23,450
Ячейки в текучей среде	23,450
Ячейки на границе раздела твердого тела с те...	6,236
Итерации	98
Последняя итерация завершилась	15:28:52
Процессорное время на последнюю итерацию	00:00:01
Продувки	1,8849
Итераций на 1 продувку	52
Процессорное время	0 : 1 : 40
Оставшееся время расчета	0 : 0 : 0
Запустить на	<b>User PC</b>
Количество ядер	4

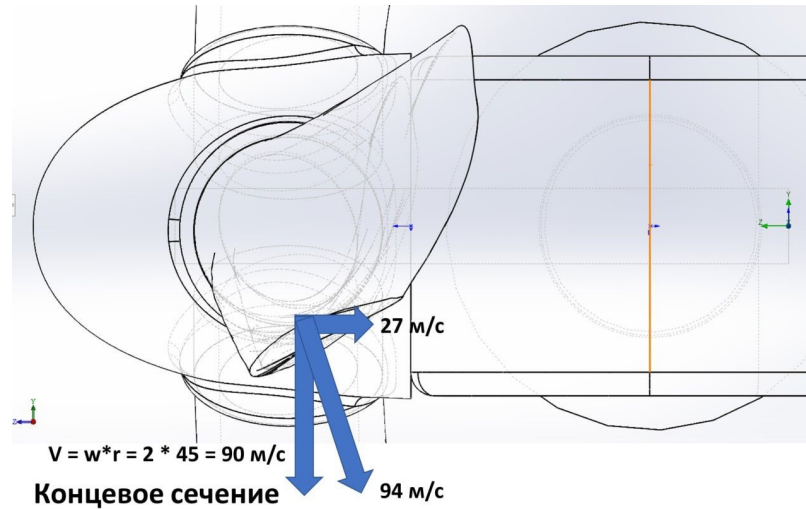
Предупреждение	Комментарий
Нет предупреждений	

Событие	Итерация	Время
Генерация сетки началась	0	15:26:46 , Jun 07
Генерация сетки завершена корректно	0	15:27:10 , Jun 07
Подготовка данных для расчета	0	15:27:12 , Jun 07
Расчет начал	0	15:27:20 , Jun 07
Расчет сошелся, т.к. следующие критерии удовлетворены:	98	15:28:52 , Jun 07
Цели сошлись	98	
Расчет закончен	98	15:28:54 , Jun 07



# Динамический расчет нагрузок



Вычисления результирующей скорости ветра, которая будет на ветрогенераторе.  
Результирующая скорость вращения - Набегающий поток + скорость вращения лопастей = по треугольнику скоростей

Пользователь не видит механического вращения, набегающий поток на лопасть моделируется так, чтобы при статическом положении лопастей формировался треугольник скоростей.