

## Исследование кинематических параметров систем приращения ветряного потока для спроектированного ветрогенератора «Объект 1-У»

*А.С. Гаваев, Д.Я. Лосев*

*Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

**Аннотация:** Существуют две главные проблемы, тормозящие ветряную промышленность – это большие потери кинематических характеристик ветряного потока при его использовании и малые порывы ветра в не северных регионах РФ. Спроектированная конфузорно-диффузорная система способна решить эти проблемы за счёт увеличения КИЭВ (Коэффициента использования энергии ветра): в статье были проанализированы спроектированные ранее системы приращения кинематических параметров ветра, которые устанавливаются на разработанный ветрогенератор с вертикальной осью вращения «Объект 1-У».

**Ключевые слова:** Конфузор, диффузор, конфузорно-диффузорная система, эффект Вентури, закон сохранения импульса, коэффициент степени сужения, числа Фибоначчи.

Согласно базовой теории Жуковского Н.Е.,  $1/3$  исходной скорости набегающего потока не попадает на лопасти ветрогенератора, а  $1/9$  часть энергии рассеивается отходящим потоком. Отсюда выводится следствие теории о максимальном коэффициенте использования энергии ветра (КИЭВ), Соответственно, идеальный ветрогенератор может использовать лишь  $59,3\%$  всей энергии ветра, если лопасти захватывают не менее  $1/3$  скорости ветра. Основная задача построения конфузорно-диффузорной системы – это приращение кинематических параметров ветряного потока, в частности увеличения его скорости. Этого можно добиться, благодаря закону Вентури [1].

На рис. 1 показана разработанная конфузорно-диффузорная система.

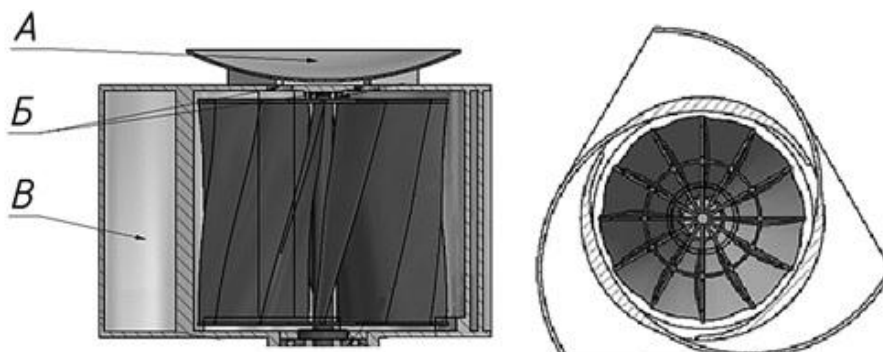


Рис. 1. – Конфузорно-диффузорная система

Поток воздушных масс нагнетается из атмосферы в камеру (В), проходя через конфузорное изменение площади сечения, и описывается эффектом Вентури, сформулированным законом Бернулли в газогидродинамике [2]. Закон постулирует: «При уменьшении площади сечения будет увеличиваться скорость потока и понижаться давление в среде» [3]. Далее поток воздуха поднимается и концентрируется кверху по вертикали, где расположены вентиляционные отверстия (Б), выполняющие функцию слияния двух сред с разными показателями давлением, что, в свою очередь, создаст эжекцию воздуха.

На корпусе установлена конфузорно-диффузорная чаша (А), через которую движется поток воздушных масс, в котором ещё больше понижается давление, что в следствии увеличивает процесс разгерметизации [4].

После прохождения камеры, приращенный ветряной поток с большей силой будет оказывать давление на лопасти и приводить их в движение [5].

Камера В построена с помощью закона последовательности чисел Фибоначчи [6] рис. 2.

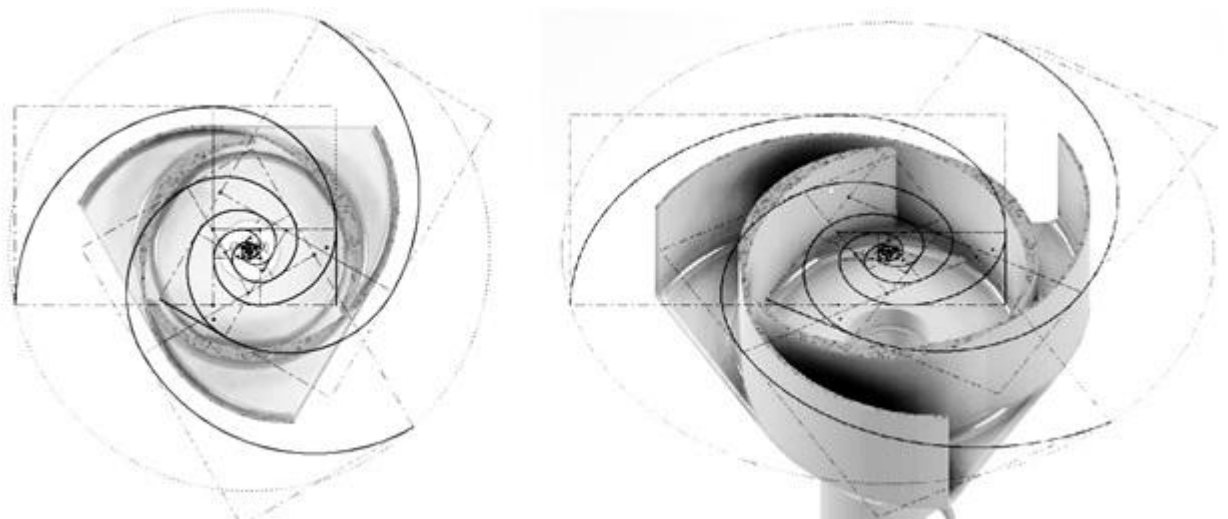


Рис. 2. – Конфузорно-диффузорная камерная система

В ходе исследований, была построена золотая спираль и массивом размножена на 3 части, между которыми 60 градусов, а из них образовалась

плавная геометрия стенок конфузорной системы. Образованные кривые имеют плавное изменение радиуса скругления по всей геометрии. Преимущества системы позволяют ветряному потоку плавно обтекать стенки камеры, не образуя зоны турбулентности. В теории, при концентрации ветра, течение будет ламинарным [7].

Опираясь на траекторию перемещения ветряного потока внутри камерной конфузорно-диффузорной системы – разработана геометрия лопастей, основной изгиб которых будет снимать максимальную энергию с ветра. На рис. 3 отражена схема кинематики движения лопасти с помощью ветряного потока.

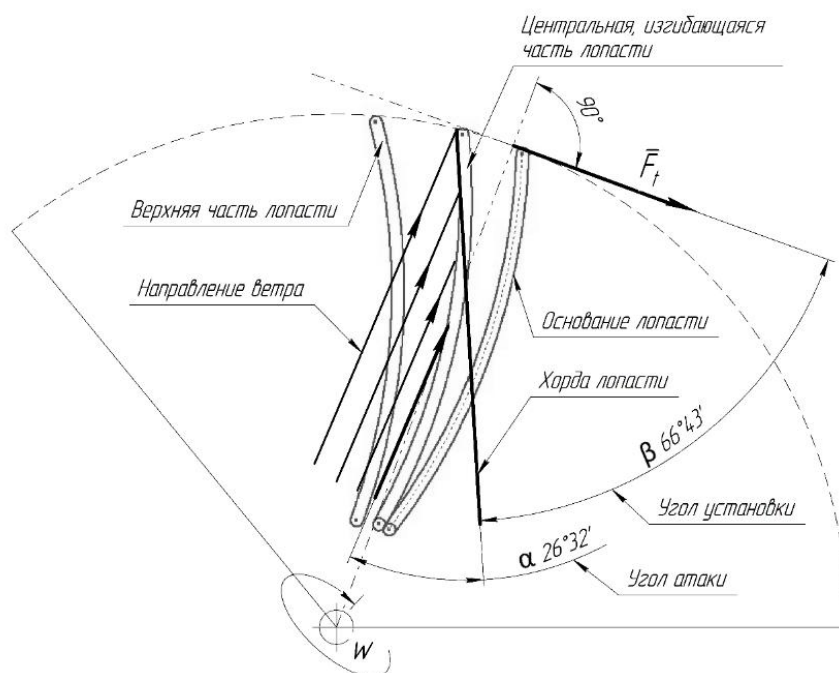


Рис. 3. – Схема кинематики лопасти

На схеме указан центр вращения вала лопастей. Пунктирной линией показана площадь, ометаемая лопастью. Лопасть раздроблена на 3 части: верхняя часть лопасти, основание и центральная, изгибающаяся часть, которая обладает преднамеренным углом смещения, служащим для принятия

сконцентрированного потока. Ветряной поток концентрируется с основания к вентиляционным отверстиям сверху конфузorno-диффузорной системы.

Набегаемый ветряной поток ударяется о вторую часть лопасти, передавая ей кинетическую энергию. На границе лопасти показана тангенсальная сила, направленная по касательной к окружности. Угол между радиус-вектором и этой силой составляет 90 градусов.

От центральной части лопасти проводится хорда по касательной у геометрии лопасти. Угол  $\beta$  между тангенциальной силой и хордой является углом установки лопасти, и нужен для определения угла атаки ветра. Угол атаки находится, как разность скоростного угла и угла установки лопасти. Чем больше угол атаки, тем больше подъемная сила лопастей (то есть увеличивается площадь в разрезе со стороны набегающего потока).

На рис. 4 показана 3D-модель спроектированных лопастей.

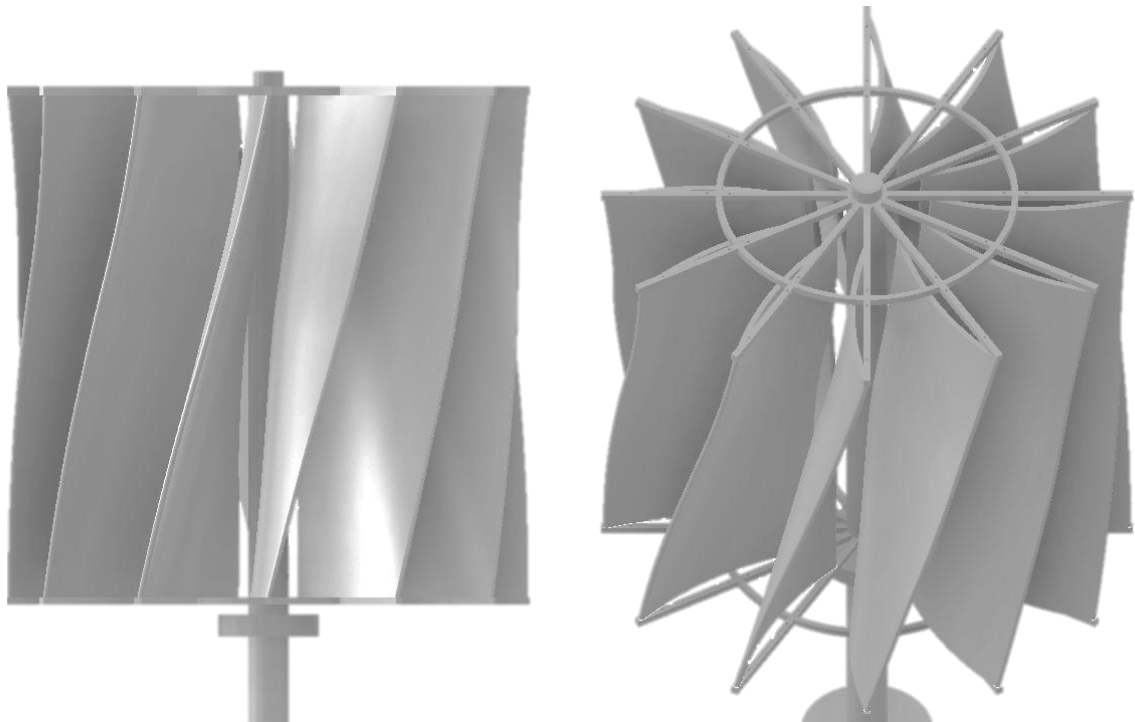


Рис. 4. – 3D-модель лопастей вертикального ветрогенератора

В качестве аналога исследуемой камерной системы, разработана система с направляющими пластинами, представленная на рис. 5.

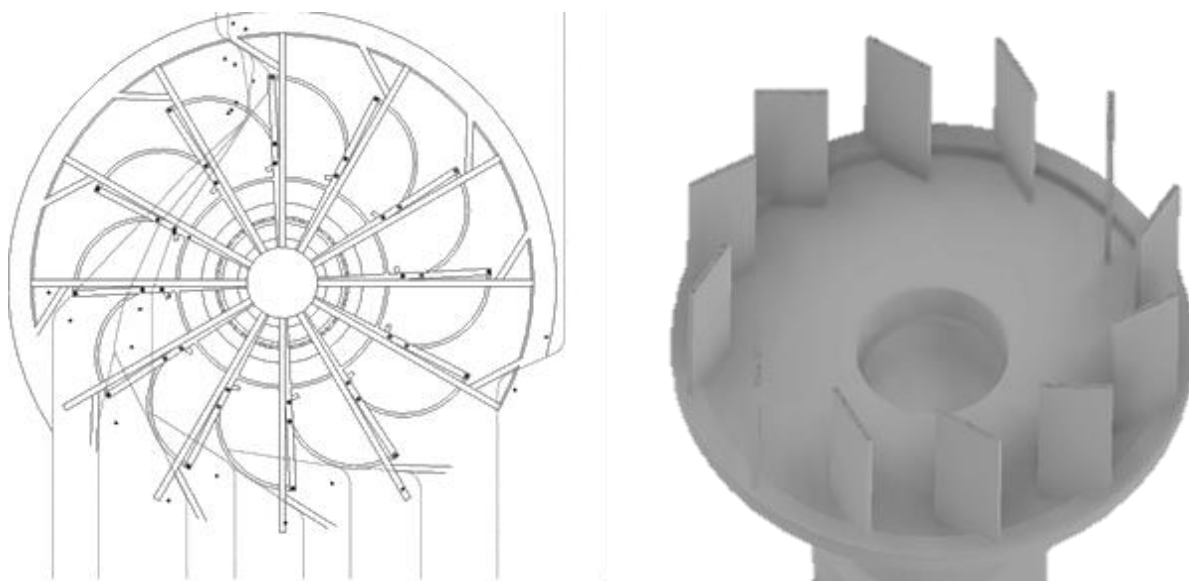


Рис. 5. – Статорная система с направляющими пластинами

Пластины расположены таким образом, чтобы перенаправить ветряной поток на лопасти ветрогенератора только с одной стороны. Противоположная сторона колеса защищена экранами от набегающего потока, тем самым отсутствует противовес торможением, отсюда наблюдаем максимально возможный коэффициент использования ветра (КИЭВ) при такой конструкции, как на рис. 5.

После построения трёхмерных моделей проведено их исследование в модулях программ SolidWorks Flow Simulation и Ansys CFX/CFD [8, 9]. В процессе расчёта определены динамические изменения параметров кинематики ветряного потока, которые впоследствии можно использовать при проектировании и создания прототипа.

Расчёт производится для трёх конструкций: открытые лопасти ветрогенератора, лопасти со статорной системой с направляющими пластинами и лопасти с конфузорно-диффузорной системой.

Произведен уточненный расчёт мощности ветряного потока, коэффициент использования энергии ветра и аэродинамический

коэффициент лобового сопротивления для установок типа 1 и 2. При расчётах берётся вырабатываемая мощность в 100 кВт.

Установка 1 - конфузорно-диффузорная камерная система.

Для продуцирования мощности 100 кВт. Согласно динамической устойчивости энергосистемы, при регулировании мощности турбин генераторов по абсолютному углу [10], для частного случая получим значения:  $r = 4$  м;  $v=14,6$  м/с. Исходная, средняя скорость ветра в близлежащих районах нефтяных месторождений Тюменской области равна  $v = 8$  м/с.

Далее подбираем коэффициент степени сужения конфузора  $\Psi$  [10], опираясь на значение нужной скорости. Минимальная скорость ветра, нужная для передачи мощности 100 кВт на вал лопастей, равна  $v = 14,6$  м/с. При скорости, равной  $v = 14,6$  м/с, получим минимальное допустимое значение  $\Psi = 17,5$ .

Создав в инженерной программе «ANSYS» реальную физическую среду и рассчитав натуральные размеры конфузора ветрогенератора [11], получим значения приращения скорости ветряного потока и сравним их с расчётами. Получившийся результат приведён на рис. 6.

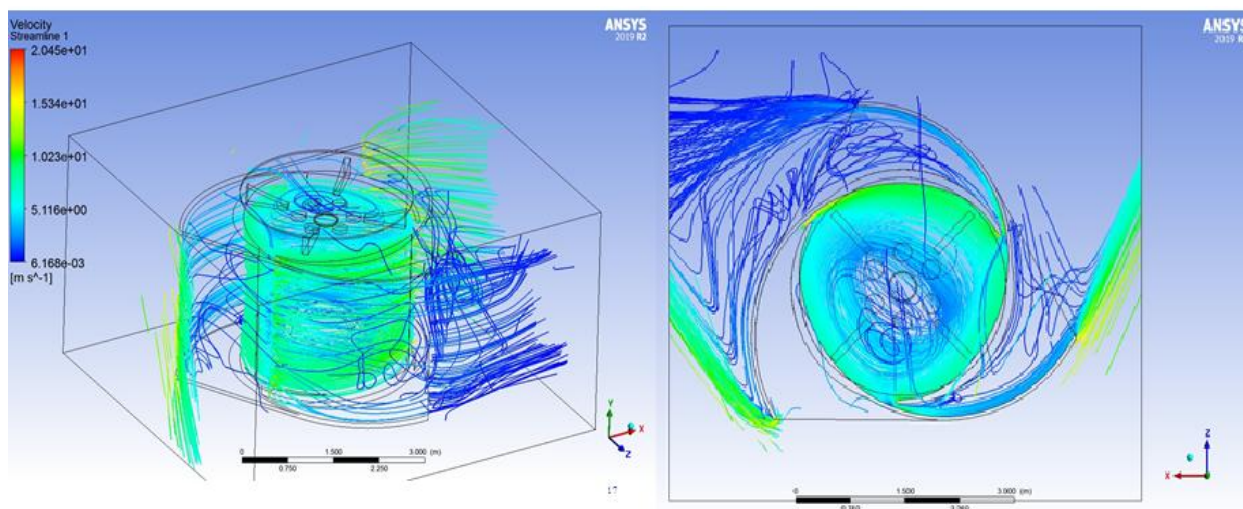


Рис. 6. – Смоделированная среда в «ANSIS»

На диаграмме расчёта ветряного потока показана траектория движения частиц газа цветными линиями. Слева приведена шкала скорости ветра. Синими линиями показаны зоны турбулентности. При переходе из одной среды (атмосферы) во вторую (камера) скорость ветра увеличивается до  $v=14,6$  м/с, что, в свою очередь, доказывает достоверность проведенного подбора. Мощность ветряного потока будет корректироваться дополнительным коэффициентом использования энергии ветра (КИЭВ) и запишется в виде (1):

$$N_{nom} = \frac{\xi \times \rho \times \pi \times r^2 \times v^3}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность ветряного потока;  $S$  – ометаемая площадь лопастей;  $v$  – скорость ветра;  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра.

На поверхности лопасти, поставленную перпендикулярно относительно траектории ветра, ветряной поток начнёт тормозиться об поверхность, оказывая давление  $P_x$ , в таком случае работа будет равна (2):

$$A = P_x \times V, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость, с которой перемещается лопасть;  $P_x$  – сила сопротивления лопастей ветру, равна:

$$P_x = \frac{C_x \times S \times \rho \times (v - V)^2}{2}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь миделевого сечения тела;  $C_x$  – средний аэродинамический коэффициент лобового сопротивления для установки 1 равен 4,312 (посчитан в SolidWorks Flow simulation).

Подставим значения в формулу (2) и получим:

$$A = \frac{C_x \times S \times \rho \times (v - V)^2}{2} \times V. \quad (4)$$

Определим коэффициент использования энергии ветра – это отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью, к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение, равное этой поверхности:

$$\xi = \frac{2 \times C_x \times S \times \rho \times (v - V)^2 \times V}{2 \times S \times \rho \times v^3}. \quad (5)$$

После расчётов получим значения  $\xi$  для установки 1:  $\xi_1=0,639$ .

С учётом КИЭВ, мощность ветра будет равна:  $N_{nom1}=63,9$  кВт.

Следовательно, КИЭВ прямо пропорционально зависит от скорости перемещения лопастей и аэродинамического коэффициента.

Аналогичным способом рассчитаем КИЭВ,  $C_x$  и  $N_{nom}$  для установки 2 и обычных лопастей. Для снятия аналогичной номинальной мощности с ветряного потока, требуется увеличить миделевое сечение лопастей, следовательно радиус и длина лопастей увеличить в 2,5 раза, согласно формуле (1). Для установки 2 и лопастей рассчитаем аналогичным методом и сводим результаты в таблицу 1

Таблица №1

Расчётные значения аэродинамических параметров

Показатель	$N_{ном,}$ кВт	$N_{ном,}$ кВт	$\xi$	$C_x$	$r$ , м	$l$ , м	$v$ , м/с
<b>Установка 1</b>	<b>100</b>	<b>63,9</b>	<b>0,639</b>	<b>4,312</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
Установка 2	100	48,7	0,487	3,29	10	20	8
Лопасты	100	34,9	0,349	1,01	10	20	8

В таблице 1 представлены Расчётные значения аэродинамических параметров исследуемых моделей. Установка 1, Установка 2 и Лопасты получали одинаковую мощность ветряного потока – 100 кВт и скорость ветра  $v=8$  м/с.

При этом наибольший показатель КИЭВ у установки 1 (конфузорно-диффузорная система) Таким образом, при размерах лопастей 4x8 м на



лопасти аккумулируются мощность равная 63,9 кВт. На установку 2 – 48,7 кВт, на пустые лопасти – 14,9 кВт.

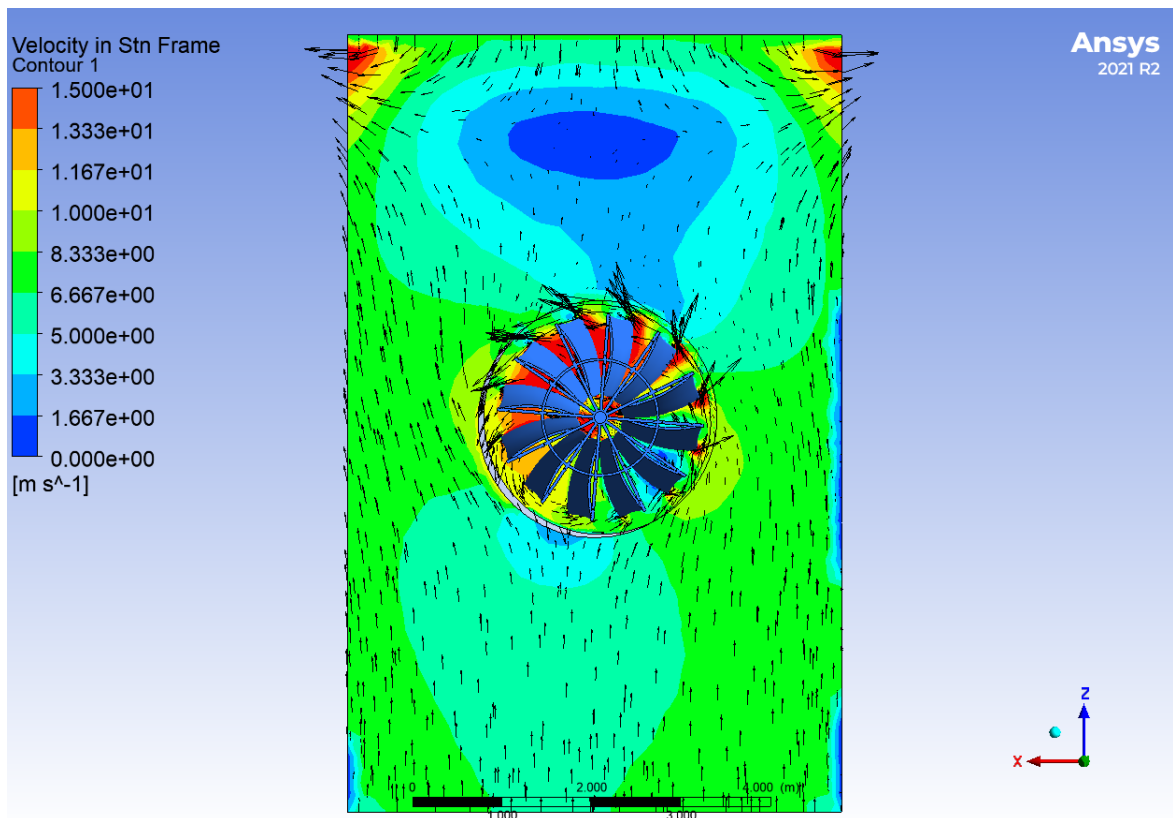


Рис. 7. – Аэродинамический расчёт лопастей

При расчёте лопастей, черными стрелками приведены траектории ветряного потока (рис. 7). На рисунке отчетливо виден эффект базовой теории Жуковского Н.Е. 1/3 исходной скорости набегающего потока не попадает на лопасти ветрогенератора, а 1/9 часть энергии рассеивается отходящим потоком. Отсюда выводится следствие теории о максимальном коэффициенте использования энергии ветра (КИЭВ), максимальное значение которого равно числу 0,593. Отсюда следует, что идеальный ветрогенератор может использовать лишь 59,3 % всей энергии используемого ветряного потока только в том случае, если лопасти захватывают не менее 1/3 скорости ветра. Учитывая теорию Жуковского Н.Е, была разработана конфузorno-диффузная система, коэффициент лобового сопротивления которой

выходит за предельное значение на 4,6 %, следовательно увеличивается КИЭВ.

В ходе исследований проведен сравнительный расчёт методом конечных элементов в созданной цифровой модели. По результатам проведенных исследований установка 1, основанная на спиральной зависимости конфузорно-диффузорной системы бесспорно показала своё превосходство. При снятии номинального потока требовалось увеличить размеры лопастей во втором и третьем случае в 2,5 раза, что существенно увеличивало конструкцию.

### Литература

1. Земсков В. И. Возобновляемые источники энергии в АПК. М.: Лань, 2014. 368 с.
2. Шефтер Я. И. Рождественский И.В. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках. Минсельхозиздат, 1957. 147 с.
3. Лосев Д.Я. Разработка оптимальной конструкции ветрогенератора, для решения проблемы электрификации нефтяных месторождений и труднодоступных регионов России // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. Тюмень, 2019. – С. 290-292.
4. Пяльченков В. А., Курсовое проектирование по дисциплине детали машин и основы конструирования. Тюмень: ТИУ, 2019. 106 с.
5. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя. М: Машиностроение, 2001. 859 с.
6. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. М.: Машиностроение, 2003. 386 с.
7. Григорьева О. А., Кривенко Т. В., Тремясов В. А. Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса // Научно-технические

ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2016. 2 (243). С. 45-52.

8. Гаваев А. С., Свистунова В. А., Чикишев Е. М., Ядрышников А.И., Эртман Ю.А. Моделирование эксплуатационных условий работы запорного устройства // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7418](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7418).

9. Chimakurthi S.K., Reuss S., Tooley M., Scampoli S. Ansys workbench system coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Engineering with Computers*. – 2018. – vol. 34. № 2. – P. 385-411. DOI: 10.1007/s00366-017-0548-4.

10. Андреюк В. А., Асанбаев Ю. А., Сказыбаева Н. С. Динамическая устойчивость энергосистемы при регулировании мощности турбин генераторов по абсолютному углу// *Электрические станции*. 2005. 12. С. 11-16.

11. Jayachitra T., Priyadarshini R. Smart monitoring system for detection of damage in structural parts by emi and ansys. *SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2021. – vol. 69. № 2. – P. 134-138. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I2P219.

### References

1. Zemskov V.I. *Vozobnovljaemye istochniki jenergii v APK [Renewable energy sources in the agro-industrial complex]*. М.: Lan, 2014. 368 p.

2. Shefter Ja. I., Rozhdestvenskij I.V. *Izobretatelju o vetrodvigateljah i vtroustanovkah [Inventor of wind turbines and wind turbines]*. Minsel'hozizdat. 1957. 147 p.

3. Losev D.Ya. *Jenergoberezhenie i innovacionnye tehnologii v toplivno-jenergeticheskom komplekse (Proc. Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex)*. Tyumen, 2019. pp. 290-292.



4. Pyalchenkov V.A. Kursovoe proektirovanie po discipline detali mashin i osnovy konstruirovaniya [Course design in the discipline of machine parts and design basics]. Tyumen: TIU, 2019. 106 p.
5. Anuryev V.I. Spravochnik konstruktora – mashinostroitelja [Handbook of the designer - machine builder]. M: Mashinostroenie, 2001. 859 p.
6. Krajnev A.F. Ideologija Konstruirovaniya [Ideology of Design]. M.: Mashinostroenie, 2003. 386 p.
7. Grigoryeva O. A., Krivenko T. V., Tremjasov V. A. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. 2016. 2 (243). pp. 45-52.
8. Gavaev A. S., Svistunova V. A., Chikishev E. M., Jadrishnikov A.I., Ertman J.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7418](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7418).
9. Chimakurthi S.K., Reuss S., Tooley M., Scampoli S. Engineering with Computers. 2018. vol. 34. № 2. pp. 385-411. DOI: 10.1007/s00366-017-0548-4.
10. Andrejuk V. A., Asanbaev Ju. A., Skazyvaeva N. S. Jelektricheskie stancii. 2005, 12, pp. 11-16.
11. Jayachitra T., Priyadarshini R. SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. vol. 69. № 2. pp. 134-138. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V69I2P219.