

УДК 536.7

**ВИХРЕВАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА**

© 2012 В. В. Бирюк, И. А. Зубрилин, А. С. Красноруцкий

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведена оценка возможности использования вихревых ветроэнергетических установок для выработки электроэнергии. Спроектирована трёхмерная модель и выполнен численный расчёт статорной части ветроэнергетической установки. Получены распределения параметров потока во всей расчётной области. Выявлена зависимость энергетической эффективности установки (ВЭУ) от статического давления на выходе из области расчёта.

*Энергия ветра, ветроэнергетическая установка, генератор вихря, математическое моделирование, поле параметров.*

В условиях непрерывного роста цен на централизованно поставляемую электроэнергию, целесообразно стремиться к сокращению или даже ликвидации зависимости потребителей от поставок внешней дорогой электроэнергии. Одно из возможных направлений - выработка электроэнергии для обеспечения собственных нужд с использованием энергии ветра. Но большинство излопастных ветрогенераторов, имеющих горизонтальную ось и установленных на башнях высотой 30-40 м, при длине лопаток ветроколеса 4 - 5 м при средней скорости ветра в 5 - 7 м/с развивают мощность порядка 800 кВт - 1 МВт. Удельные капитальные вложения в эти установки находятся на уровне 1200 - 1400 \$/кВт. Высокая стоимость и возможность получения требуемой мощности только в районах с высокими ветровыми нагрузками затрудняют их использование.

Более эффективны тороидальные ветроэнергетические установки. Их работа основана на получении в гиперболическом статоре закрученного воздушного потока, подобного по своим свойствам природному смерчу и обладающего значительным запасом кинетической энергии. В приосевой, центральной области вихря, сформированного в статоре, давление понижено относительно внешнего атмосферного давления. Благодаря этому в смерчеобразный столб всасывается дополнительная масса воздушного потока. В осевом ветроколесе с вертикальной осью преобразуется кинетическая энергия

воздушного потока в механическую работу, используемую для выработки электроэнергии в электрогенераторе.

Тороидальные ветроэнергетические установки развивают рабочую мощность при значительно меньшей скорости ветра (2 - 3 м/с). Кроме того, установки этого типа позволяют получать примерно в пять раз большую мощность, чем ветроагрегаты с горизонтальной осью (при одинаковых площадях ометаемых ветроколесом).

Вместе с тем из сбросных труб котельных и технологических агрегатов предприятий ежесекундно выбрасывается в атмосферу несколько миллионов килограмм отработавших газов со скоростями порядка двадцати метров в секунду и с температурой до четырёхсот градусов Цельсия. При этом практически не используется их значительный энергетический потенциал. Кинетическая энергия уходящих газов данных агрегатов сравнительно невелика и практически позволяет при её использовании генерировать сравнительно небольшую электрическую мощность, порядка 10-20 кВт, недостаточную для обеспечения собственных нужд. В случае стремления увеличить скорости уходящих газов и их кинетическую энергию, потребовалось бы уменьшать диаметры выхлопных труб агрегатов. Но при этом произойдёт повышение сопротивления выхлопных трактов агрегатов.

Представляет интерес создание новых типов энергетических установок путём разработки ветроэлектроагрегатов

смерчевого типа с вертикальной осью и возможностью эффективного использования энергетического потенциала потока отходящих газов агрегатов и кинетической энергии ветра.

В зависимости от типа технологических агрегатов (расхода и температуры выхлопных газов) электрическая мощность ветроэнергетических установок даже в безветренную погоду может составлять от 80 до 200 кВт. Причём с увеличением скорости ветра возрастает смерчевой эффект с повышением мощности установки.

На рис. 1 изображена принципиальная схема движения потоков отходящих газов и атмосферного воздуха в ветроэнергетической установке.

Установка имеет входной завихритель воздушного потока 1, вызывающий его смерчевое вращение с увеличением скорости и создание разрежения в осевой части вихря, а также тангенциальное ускорение сбрасываемого потока газов. Предварительно подкрученный поток газов, выходящий из выхлопной трубы 2, поступает в центральную часть цилиндрического статора 3 и смешивается, тангенциально ускоряясь в нём вместе с воздушным потоком. За счёт того, что в осевой части статора развивается небольшое разрежение относительно атмосферного давления, этот принцип не влечёт за собой увеличение сопротивления выхлопного тракта. Если на периферии гиперболического статора 4 преобладает тангенциальная составляющая скорости закрученного газозвоздушного потока, то в его центральной части происходит значительное увеличение осевой скорости потока.

Важно, что при увеличении скорости ветра в ветроэнергетической установке возрастает смерчевой эффект, сопровождающийся увеличением скорости и расхода газозвоздушной смеси, вызывающий повышение её мощности.

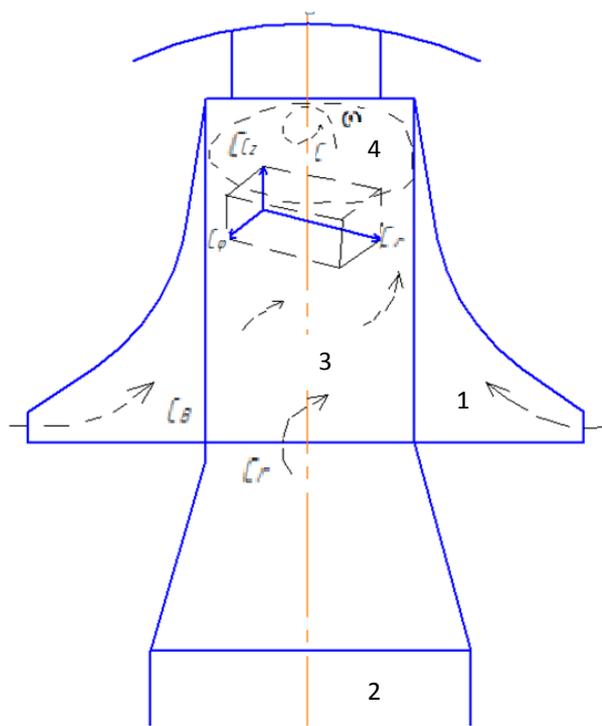


Рис. 1. Схема газозвоздушных потоков в статоре установки:

- 1 – входной завихритель воздушного потока;
  - 2 – выхлопная труба;
  - 3 – осевая часть цилиндрического статора;
- $C_B, C_T$  – скорости воздушного и газового потоков на входе в ветроэнергетическую установку;  
 $C$  – абсолютная скорость газозвоздушного потока у стенок статора;  
 $C_z, C_r, C_\phi$  – проекции скорости  $C$  на оси координат;  
 $\omega$  – осевая скорость газозвоздушного потока

Рассмотренный принцип и конструктивная схема ветроэнергетической установки дают возможность достаточно эффективно использовать энергию отходящего потока газов технологических агрегатов и кинетическую энергию воздушных потоков. При этом для неё характерны следующие положительные качества:

- увеличение скорости и кинетической энергии газозвоздушного потока с их использованием для выработки электроэнергии;

- разбавление горячих выхлопных газов потоком воздуха, снижение температуры сбросного потока газозвоздушной смеси, уменьшение в них концентрации вредных веществ, что позволяет уменьшать высоту выхлопных труб агрегатов;

- главный положительный фактор - за счёт собственного электроснабжения производственных нужд появляется

возможность повышения энергоэффективности агрегатов.

Создание вихревых ветроэнергетических установок основано на возможности получения в специальных генераторах закрученного потока (рис. 2), подобного по своим свойствам природному смерчу, обладающему значительным запасом кинетической энергии. В приосевой, центральной области сформированного в устройстве вихря, давление понижено по отношению к внешнему атмосферному давлению, что способствует образованию тяги и всасыванию тем самым в этот смерчеобразный столб дополнительной массы воздуха.

Важным фактором, вынуждающим воздух двигаться по заданным траекториям, является избыточное давление торможения  $P^*$ , определяющее величину азимутальной компоненты скорости вращения потока при выбранной форме закручивающего канала статора.

Зная давление торможения для всех сечений канала можно определять значения составляющих скорости потока – осевой  $V_{zi}(r)$ , радиальной  $V_{ri}(r)$  и азимутальной  $V_{\phi i}(r)$ .

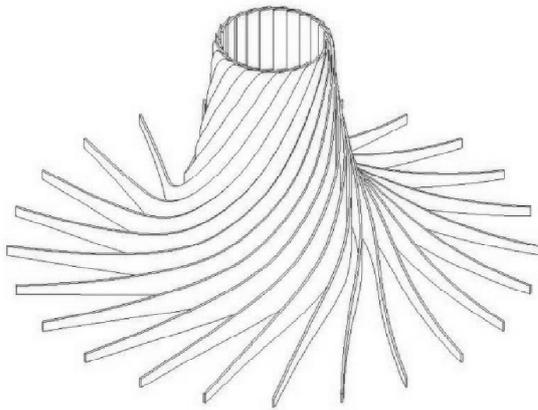


Рис. 2. Генератор закрученного потока

Условием работоспособности ветроэнергетической установки является зависимость:

$$P(r, z) + \frac{\rho V^2 z(\text{вых})}{2} \geq p_{\text{атм}} \quad (1)$$

при условии, что вся энергия потока с компонентом скорости  $V_{\phi}$  полностью перейдет в полезную работу, а величина  $P(r, z)$  - давление за ротором энергетической

установки. Если это условие не соблюдается, то часть кинетической энергии закрученного потока следует превращать в давление подтормаживания струи. Очевидно, что ВЭУ имеет свои границы устойчивой работы, определяемые минимальными значениями  $P(r, z)$  и  $V_z(r)$ .

Статор энергетической установки, являющийся генератором закрученного потока, образован группой симметрично расположенных по окружности каналов, воспроизводящих траекторию движения воздушных струй в природных смерчах, стекающихся в центральную осевую зону статора.

Каналы предлагаемой энергетической установки имеют специальный профиль в горизонтальной и вертикальной плоскостях, и в центральную зону поступают струи, "сшивающиеся" в общий смерчеобразный вихревой поток. Поэтому движение в канале рассматривается как безотрывное, ускоряющееся к выходной щели.

Для проведения численного расчёта методами вычислительной газовой динамики в прикладных программных пакетах КОМПАС-3D, GAMBIT, ANSYS FLUENT создана расчётная модель, выделена область течения, создана конечно-элементная сетка, заданы граничные условия и параметры для решения задачи [1].

Для проведения численного расчёта аэродинамических процессов в статорной части ветроэнергетической установки были выбраны следующие граничные условия:

- расход горячего газа  $G_g=0,02$  кг/с;
- температура горячего газа  $T_g=690$  К;
- полное давление на входе холодного газа  $P_{\text{пол}}=1$  атм;
- температура холодного газа  $T_c=300$ К;
- статическое давление на выходе из расчётной области  $P_{\text{ст}}=1$  атм.

Для удобства задания граничных условий и снятия параметров в программе ANSYS FLUENT принята в качестве единиц измерения давления 1 стандартная атмосфера (1 atm), равная 101325 Па.

В результате расчёта были получены картина течения газа в каналах статорной части ветроэнергетической установки, распределение параметров в каждой точке, поля распределения параметров потока.

При этом расход рабочего тела в основных расчётных зонах составляет:

Расчетные зоны	Расход рабочего тела (MassFlowRate), Кг/с (kg/s)
gor	0.02
vixod	0.0461
xol	0.0261

При анализе работы ветроэнергетической установки при данных начальных условиях наблюдается значительный подсос холодного газа в зону вихреобразования.

Для более детального анализа поля скоростей рабочего тела были построены векторные поля его скоростей – его тангенциальной составляющей в различных сечениях установки.

При анализе векторного поля скоростей можно сделать вывод, что поток имеет значительную тангенциальную закрутку и подтверждает тем самым гипотезу о смерчеобразовании в расчётной области при смешении горячего и холодного потоков рабочего тела.

Представляют интерес зависимости параметров работы ветроэнергетической установки от величины статического давления на выходе из расчётной области  $P_{ст}$ , а, следовательно, и от скорости движения холодного газа в атмосфере (скорости набегающего на установку воздушного потока).

На основании полученных результатов расчётов построены зависимости параметров работы ветроэнергетической установки от величины статического давления на выходе из области расчёта (рис. 3).

Проанализировав зависимости, приведённые на рис.3 и рис.4, отметим, что эффективный диапазон работы ветроэнергетической установки, с точки зрения прироста импульса расхода рабочего тела, зависит от статического давления на выходе из области расчёта. Для энергоэффективной работы ветроэнергетической установки необходимо, чтобы значение статического давления на выходе из области расчёта было в пределах от 0,992 до 0,997 atm.

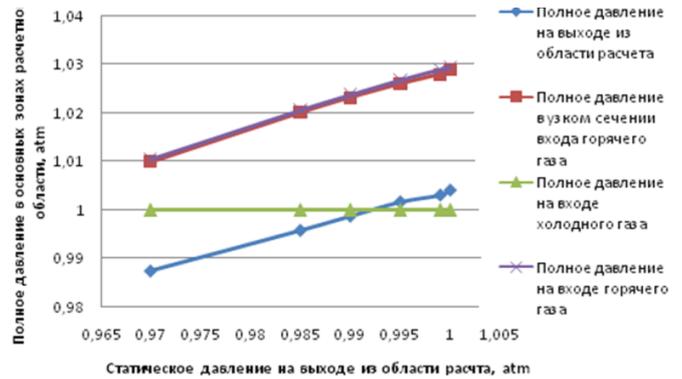


Рис. 3. Зависимость полного давления в основных зонах расчётной области от величины статического давления на выходе из области расчёта

Для оценки энергетической эффективности исследуемой модели статорной части ветроэнергетической установки воспользуемся величиной импульса рабочего тела, рассчитанного по формуле

$$p = G \times V_y, \quad (2)$$

где  $p$  – импульс рабочего тела;

$G$  – расход рабочего тела;

$V_y$  – вертикальная составляющая скорости рабочего тела.

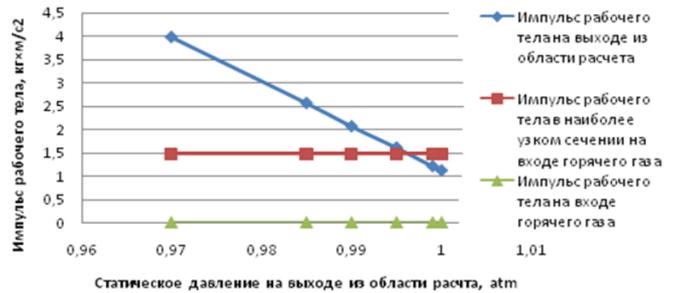


Рис. 4. Зависимость импульса рабочего тела в основных зонах расчётной области от величины статического давления на выходе из области расчёта

Из всего отмеченного следует, что полученная в компьютерных расчётах картина качественно хорошо согласуется с теоретическими предположениями о характере работы ветроэнергетической установки.

Вихревая ветроэнергетическая установка предназначена для преобразования энергии ветра и исходящего из выхлопного устройства технологического агрегата потока газа в электрическую энергию постоянного тока напряжением 12В или в энергию переменного тока – 220В 50Гц.

По сравнению с другими установками, работающими от энергии ветра (карусельного и крыльчатого типа), ветроэнергетическая установка обладает более высоким КПД и мощностью. В

настоящее время на территории Российской Федерации существует множество организаций по производству вихревых энергоустановок, но производимые установки имеют малую мощность 1,5-4 кВт и, как следствие, не способны обеспечивать электроэнергией крупных потребителей, нуждающихся в дешёвом энергоснабжении. Данная установка рассчитана на крупных

потребителей, удалённых от централизованного энергоснабжения.

#### Библиографический список

1. Бирюк, В.В. Методика расчёта вихревых установок [Текст]/ Бирюк В.В., Серебряков Р.А., Толстоногов А.П. - Самара: НТО, СГАУ, 1992 - 96 с.

### VORTICAL GAZ-WIND-ENERGY PLANT

© 2012 V. V. Biryuk, I. A. Zubrilin, A. S. Krasnorutskiy

Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The estimation of possibility of use combined vorticalvind-energy plants for development of the electric power. The three-dimensional model is designed and numerical calculation stator parts vind-energy plant is executed. Distributions of parameters of a stream in all settlement area are received. Dependence of power efficiency of installation on static pressure on an exit from calculation area is revealed.

*Wind power, vind-energy plant, the whirlwind generator, mathematical modeling, a field of parameters.*

#### Информация об авторах

**Бирюк Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: термодинамика.

**Зубрилин Иван Александрович**, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru). Область научных интересов: процессы горения, тепломассообмена и диффузии, CALS-технологии.

**Красноруцкий Алексей Сергеевич**, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [Samuray63rus@mail.ru](mailto:Samuray63rus@mail.ru). Область научных интересов: вихревой эффект и его применение в технике.

**Biruk Vladimir Vasilevich**, doctor of engineering science, professor, deputy head of the department of thermotechnics and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: thermodynamics.

**Zubrilin Ivan Aleksandrovich**, engineer, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [zubrilin416@mail.ru](mailto:zubrilin416@mail.ru). Area of research: burning processes, processes of heat exchange and diffusion, CALS- methods.

**Krasnorutskiy Alexei Sergeevich**, the postgraduate student of the department of thermotechnics and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [Samuray63rus@mail.ru](mailto:Samuray63rus@mail.ru). Area of research: Vortical effect and its application in a technique.