

УДК 621.431.75

МЕТОДИКА РАСЧЁТА И АНАЛИЗА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ВИХРЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

© 2013 В. В. Бирюк, Д. А. Угланов, А. А. Горшкалёв,
Д. В. Большов, А. С. Красноруцкий, В. А. Лапшина, П. А. Чертыковцев

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

Приводится полуэмпирическая методика расчёта вихревых ветроэнергетических установок. Методика составлена с учётом теории вихревого эффекта Ранка, а также положений гипотезы взаимодействия вихрей в закрученных газовых потоках.

Вихревой эффект, энергетическое разделение, закрученный поток газа, вихревая ветроэнергетическая установка, методика расчёта характеристик.

Эффект разделения газа или жидкости при закручивании в цилиндрической или конической камере на две фракции был исследован ещё французским инженером Жозефом Ранком в 20-е годы XX века. На периферии образуется закрученный поток с большей температурой, а в центре — закрученный охлаждённый поток, причем вращение в центре происходит в противоположную вращению на периферии сторону. Оказалось, что при возникновении вихревого эффекта наблюдается распределение не только потоков на холодный и горячий, но и давлений между центром и периферией. На основе этого свойства были разработаны некоторые устройства, одним из которых и является вихревая ветроэнергетическая установка (ВВЭУ). Рассмотрим её подробнее.

Создание ВВЭУ основано на возможности получения в специальных генераторах закрученного потока, подобного по своим свойствам природному смерчу, обладающему значительным запасом кинетической энергии. В приосевой, центральной области сформированного в устройстве вихря давление понижено по отношению ко внешнему атмосферному давлению, что способствует образованию тяги и всасыванию в этот смерчеобразный столб дополнительной массы воздуха (рис. 1).

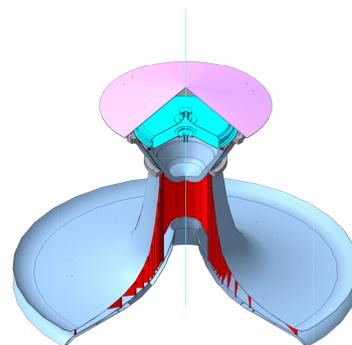


Рис.1. Модель ВВЭУ

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.

Величина избыточного давления торможения:

$$p^* = p(r, z) + \frac{r[V_f(r)]^2}{2} + r \int_0^r \frac{[V_f(r)]^2}{2} dr. \quad (1)$$

Зная давление торможения для всех сечений канала, можно определить значе-

ния компонентов скорости потока – осевой $V_{zi}(r)$, радиальной $V_{ri}(r)$ и азимутальной $V_{\phi i}(r)$ (рис. 2). Физический смысл составляющих ($V_{zi}(r)$, $V_{ri}(r)$, $V_{\phi i}(r)$) скорости потока позволяет считать, что $V_r(r)$ интенсифицирует давление у стенок цилиндрической камеры статора ВВЭУ; $V_z(r)$ расходуется в энергетическом балансе на преодоление гидравлического сопротивления в осевом движении вихря; $V_{\phi i}(r)$ частично преобразуется в энергию в форме механической работы потока на лопатках ротора ВЭУ и частично рассеивается в окружающую среду.

Условие работоспособности ВВЭУ является зависимостью

$$p(r, z) + \frac{r V_{z(вых)}^2}{2} \geq p_{атм}. \quad (2)$$

при условии, что вся энергия потока с компонентой скорости V_{ϕ} полностью перейдет в полезную работу, а величина $p(r, z)$ – давление за ротором ВВЭУ. Если это условие не соблюдается, то часть кинетической энергии закрученного потока следует превращать в давление подтормаживания струи. Очевидно также, что ВЭУ имеет свои границы устойчивой работы, определяемые минимальными значениями $p(r, z)$ и $V_z(r)$.

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

Так как каналы проектируемой ВВЭУ имеют специальный профиль в горизонтальной и вертикальной плоскостях, изменяющийся от сечения к сечению так, что в центральную зону должны поступать струи, «сшивающиеся» в общий смерчеобразный вихревой поток, движение в канале рассматривается как безотрывное, ускоряющееся к выходной щели.

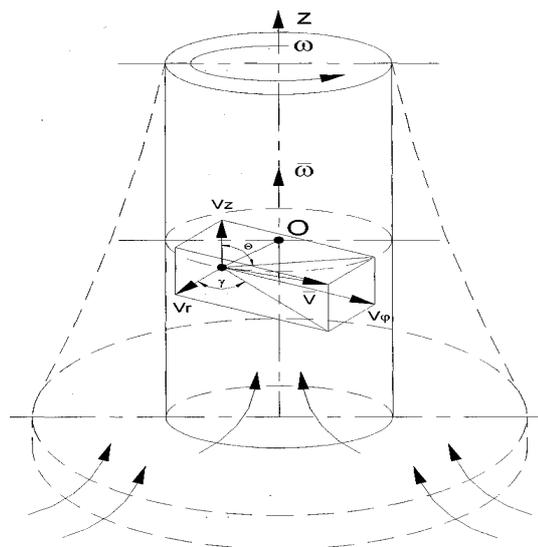


Рис.2. Компоненты скорости потока в цилиндрической зоне статора

Траектория воздушных струй, обеспечивающая условия для образования квазипотенциального ламинаризованного потока, подобного природному смерчу, описывается системой из двух уравнений, характеризующей её в двух плоскостях. Проекция траектории на горизонтальную плоскость описывается уравнением:

$$f_i = f_0 + \frac{V_f(r)}{V_r(r)} \cdot r_c^2 \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_0^2} \right), \quad (3)$$

а в вертикальной плоскости проекции – уравнением:

$$z_i = \frac{const}{r_i^2}. \quad (4)$$

При разработке физической модели течения газового потока ВВЭУ, а также при исследованиях было выяснено, что для потенциального вращательного поступательного одномерного потока в круглой трубе радиуса r , с внутренней условной цилиндрической границей с радиусом $(r \cdot \xi)$, на котором предполагается значение $p=0$ для потенциального потока, всегда напор и циркуляция $\Gamma = const$. Следовательно, азимутальная составляющая газового потока:

$$V_f = \frac{\Gamma_0}{2pr} \left(1 - \exp \left[-\frac{G_0 \cdot r^2}{2\Omega n} \right] \right) \quad (5)$$

Циркуляция из соотношения $\Gamma_0 = 2 \pi r V_\phi$, может быть определена как $\Gamma_0 = \omega^2 r$. Приняв расход газа равным

$$G = p \cdot r_c^2 (1 - x^2) \cdot V_z, \quad (6)$$

можно определить значение осевой составляющей потока V_z .

Значение радиальной составляющей скорости находим соответственно:

$$V_r = - \left(\frac{G_0}{\Omega_u^*} \right) \cdot r, \quad (7)$$

где Ω_u^* – объём цилиндрической зоны статора.

Компоненты скорости V_ϕ и V_r возрастают к оси камеры по гиперболическому закону. Величина азимутального угла траектории движения по всему потоку постоянна:

$$tg \alpha = \frac{V_f}{|V_r|}. \quad (8)$$

Радиус циркуляционной зоны r_c очевидно играет важную роль, так как им определяется проходное сечение канала основного потока, на выходе из камеры и вблизи окружная скорость V_ϕ достигает максимального значения.

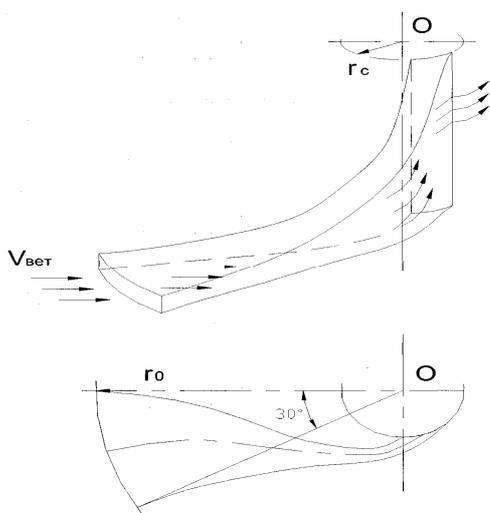


Рис.3. Схема канала статора

На основе этих соображений принимаем в качестве рабочего параметра радиус цилиндрической зоны статора, где как раз осуществляется смерчеобразная закрутка потока воздуха. Эта величина определяет не только габаритные, но и газодинамические характеристики статора ВВЭУ.

Чтобы рассчитать модель статора ВВЭУ, должны быть известны следующие параметры:

- 1) скорость ветра $V_{вет}$;
- 2) температура воздуха T ;
- 3) давление окружающей среды P_a ;
- 4) плотность воздуха ρ ;
- 5) кинематическая вязкость воздуха ν ;
- 6) расход газа G_0 ;
- 7) диаметр трубы выхлопного устройства d ;
- 8) тип статора: с эжекцией/ без эжекции;
- 9) радиус основания статора r_0 ;
- 10) высота статора H_c .

Для расчёта геометрических характеристик кожуха статора и внутреннего обтекателя используются следующие соотношения:

$$r_i' = \frac{r_c}{\sqrt{\bar{z}_i}}; \quad r_i'' = \frac{r_c}{\sqrt{\bar{z}_i}} - r_c. \quad (9)$$

где \bar{z}_i – относительная координата сечения кожуха по высоте статора $\bar{z}_i = 0,1; 0,2; 0,3; \dots; 1,0$; i – номер сечения.

Тогда скоростные характеристики воздушного потока в статоре можно найти по следующим зависимостям:

–азимутальная составляющая скорости потока в статоре

$$V_{fi} = \frac{\Gamma_0}{2pr_i} \left(1 - \exp \left[-\frac{G_0 \cdot r_i^2}{2\Omega_u^* n} \right] \right), \quad (10)$$

где $\Gamma_0 = V_{вет} \cdot r_0$ – циркуляция потока;

–радиальная составляющая скорости потока в статоре

$$V_{ri} = - \left(\frac{G_0}{\Omega_u^*} \right) \cdot r_i; \quad (11)$$

–осевая составляющая скорости потока в статоре

$$V_{zi} = 2 \left(\frac{G_0}{\Omega_y^*} \right) \cdot z_i ; \quad (12)$$

–угловая скорость потока

$$w_i = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{\Delta p}{r}} . \quad (13)$$

Расчёт проводится по сечениям, поэтому в итоге получается определённая таблица скоростей, с помощью которой строятся графики и отслеживаются изме-

нения скорости потока от сечения к сечению. Это, в свою очередь, позволяет корректировать геометрию статора с целью достижения максимальной эффективности.

Для расчёта гидравлических потерь в статоре необходимо условно разделить канал на 3 участка, для каждого из которых находится коэффициент гидравлического сопротивления.

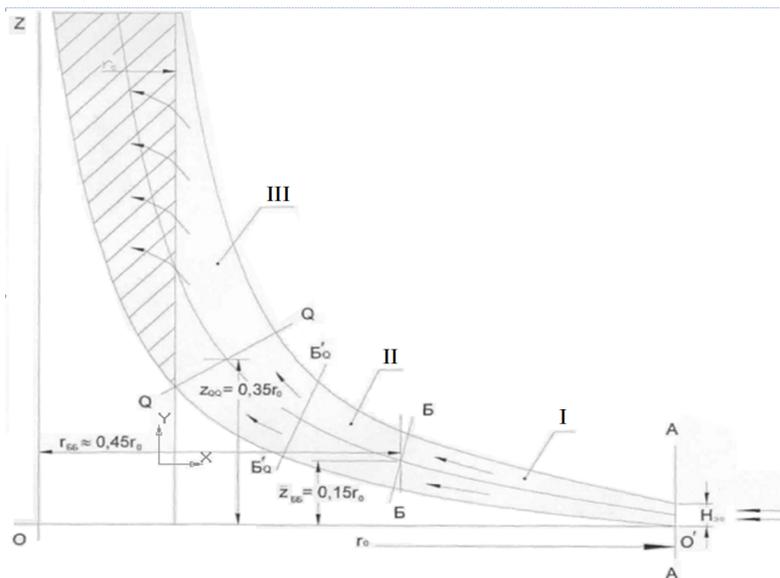


Рис. 4. Схема расчётных сечений ВВЭУ

Коэффициент гидравлического сопротивления I (первого) участка определяем по соотношению

$$x_I = x_a + 0,3 \exp(-\text{Re} \cdot 10^{-5}) = x_a + \Delta x_k . \quad (14)$$

Значение ξ_a определяем по формуле

$$x_a = \left(C_0 + C_1 \frac{b'}{a'} \right) \cdot \left(\frac{F_{B-B}}{F_{A-A}} \right)^2 . \quad (15)$$

Для второго участка коэффициент гидравлического сопротивления

$$x_{II} = Ax'_m + I \left(\frac{l_k}{d_{Q-Q}} + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot d \frac{r_{Q-Q}}{d_{Q-Q}} \right) . \quad (16)$$

Для третьего участка коэффициент гидравлических потерь принимают $\xi_{III}=0,001$.

Тогда полные потери составят

$$x_{кан} = x_I + x_{II} + x_{III} . \quad (17)$$

Чтобы рассчитать необходимые характеристики ротора, необходимо учитывать, что физическая модель течения воздуха через лопаточную решетку ротора может быть представлена следующим образом. Кинетическая энергия закрученного потока, поступающего на лопатки ротора, создаёт окружное усилие R_u , которое определяет величину вращательного момента на валу. Точкой приложения результирующей силы приближённо считаем средний радиус ротора r_{cp} .

Обтекание профиля лопатки происходит с некоторой относительной скоростью, обусловленной окружной скоростью вращения ротора W .

В физической модели важное значение имеет схема течения и быстроходность, аэродинамические характеристики лопастей связанные с ними геометрические параметры и основные конструктив-

ные размеры колеса. Обтекание лопастей характеризуется тем, что поток воздуха, поступающий на решётку ротора, сильно закручен, на выходе из статора он изменяет направление движения. Могут возникнуть осесимметричные локальные течения воздуха (по числу закручивающих каналов статора). Неравномерность скоростей по окружности статора может достигать 20 %. При увеличении диаметра ротора выше оптимальной величины между локальными течениями с повышенными скоростями в щели образуются зоны обратного течения воздуха и окружных вихрей, вызывая некоторую парциальность подвода рабочего тела к лопастям ротора.

К основным геометрическим характеристикам ротора относятся следующие:

- наружный радиус лопасти колеса $r_{2лон}$;
- внутренний радиус лопасти колеса $r_{1лон}$;
- высота ротора H_p ;
- площадь, ометаемая лопастями

$$F_{ом} = p(r_{2лон}^2 - r_{1лон}^2); \quad (18)$$

- средний радиус лопасти колеса:

$$r_{ср.лон} = \sqrt{\frac{r_{1лон}^2 + r_{2лон}^2}{2}}. \quad (19)$$

Также необходимо определить:

- угол атаки лопасти

$$a_{opt} = 1^0 \dots 8^0;$$

- угол установки лопасти:

$$b_{opt} = \arctg \frac{V_z}{V_j} - a_{opt}; \quad (20)$$

- хорду лопасти

$$b = \frac{H_p}{\sin b_{opt}}; \quad (21)$$

- средний шаг лопастей

$$t_{ср} = b \cdot (0, 2 \dots 0, 3); \quad (22)$$

- число лопастей

$$n_\lambda = \frac{2p r_{ср}}{t_{ср}}; \quad (23)$$

- длину лопасти колеса

$$h = r_{2лон} - r_{1лон}; \quad (24)$$

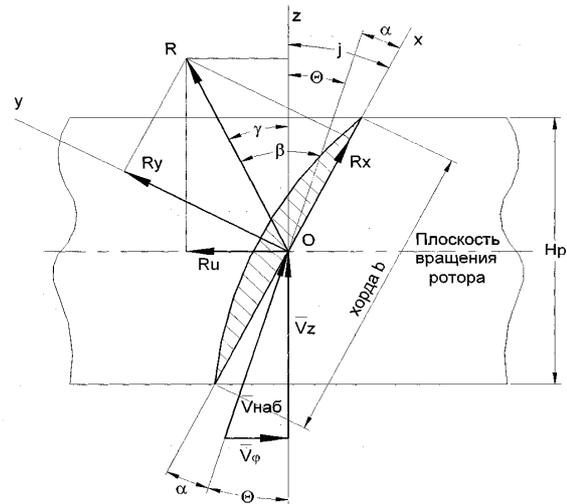


Рис. 5. Расчётная схема аэродинамических сил, действующих на лопасть ротора

- площадь лопасти

$$S_\lambda = b \cdot h; \quad (25)$$

- скорость набегающего потока

$$V_{наб} = \sqrt{V_z^2 + V_j^2 + V_r^2}; \quad (26)$$

- угловую скорость потока в роторе

$$w_p = \frac{1}{r_{ср}} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}. \quad (27)$$

После этого определяются следующие параметры:

- аэродинамическая сила на лопасть

$$R_u = r \frac{V_{наб}^2}{2} S_\lambda (C_y \sin b_{opt} - C_x \cos b_{opt}); \quad (28)$$

- момент, создаваемый лопастями ротора

$$M_p = R_u \cdot r_{ср} \cdot n_{лон}; \quad (29)$$

- теоретическая мощность на валу ротора

$$N_m = M_p \cdot w_p; \quad (30)$$

- фактическая мощность ВВЭУ

$$N_\phi = N_m \cdot h;$$

- коэффициент использования энергии ветра

$$K_{эв} = \frac{N_\phi}{N_m}; \quad (31)$$

–относительный момент на валу ротора

$$\bar{M} = \frac{2M_p}{\rho \cdot r_{\text{лон}} \cdot r \cdot V_{\text{наб}}^2}; \quad (32)$$

–коэффициент нагрузки на ометаемую площадь

$$B = \frac{2R_u}{\rho \cdot r_{\text{лон}}^2 \cdot r \cdot V_{\text{наб}}^2}; \quad (33)$$

–число модулей на конце лопасти

$$z = \frac{W_p \cdot r_{\text{лон}}}{V_{\text{наб}}}. \quad (34)$$

Данная методика является универсальным инструментом расчёта вихревой ветроэнергетических установок.

В настоящее время в условиях ограниченности невозобновляемых источников энергии подобного рода установки могут найти широчайшее применение как в промышленности, так и в повседневной жизни. За счёт своей конструкции, включающей нижний эжектор, ВВЭУ может служить источником электроэнергии для обеспечения собственных нужд газоперекачивающих станций. Так как эффективность установки увеличивается при её расположении над восходящими потоками, то область её применения значительно

увеличивается. ВВЭУ устанавливается над шахтами лифтов для электроснабжения подъездов жилых домов, над вытяжными шахтами бассейнов и т.д.

ВВЭУ находит также применение в частном хозяйстве. Системы автономного энергоснабжения на основе солнечных батарей и ВВЭУ все прочнее входят в повседневную жизнь и со временем могут послужить посылком для создания энергоэффективных поселений.

Библиографический список

1. Бирюк, В.В. Методика расчёта вихревых установок [Текст] / В.В. Бирюк, Р.А. Серебряков, А.П. Толстоногов. – Самара: НТО, СГАУ, 1992. – 96 с.
2. Вихревая ветроэнергетика [Текст] / Р.А. Серебряков, В.В. Бирюк, А.П. Толстоногов [и др.]. РК техника: научно-технический сборник.– 1999.– Серия 12. – С. 41-61.
3. Бирюк, В.В. Вихревая газоветро-энергоустановка для электроснабжения компрессорных станций [Текст]/В. В. Бирюк, И. А. Зубрилин, А. С. Красноручский//Вестник СГАУ. – 2001. – Вып. 5. – С. 29-35.

METHOD OF CALCULATION AND ANALYSIS OF GAS FLOW AERODYNAMIC INDICES IN A VORTEX WIND POWER PLANT

© 2013 V. V. Biryuk, D. A. Uglanov, A. A. Gorshkalev, D. V. Bolshov, A. S. Krasnorutskiy, V. A. Lapshina, P. A. Chertykovtsev

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

The article presents a semi-empirical method for calculating vortex wind plants. The method takes into account the theory of vortex Ranque effect and the provisions of the hypothesis of vortex interaction in swirling gas flows.

Vortex effect, energy division, swirling flow of gas, vortex wind power plant, method of calculating characteristics.

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). Область научных интересов: тепломассообмен, энергоресурсосбережение.

Угланов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, бортовая энергетика, энергосбережение.

Горшкалев Алексей Александрович, инженер кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: AGorsh@bk.ru. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов тепловых машин.

Большов Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: тепломассообмен, энергоресурсосбережение.

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

Лапшина Варвара Александровна, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: тепломассообмен, энергоресурсосбережение.

Чертыковцев Павел Александрович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: тепломассообмен, энергоресурсосбережение.

Biryuk Vladimir Vasilyevich, doctor of technical science, professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: heat and mass transfer, energy and resources saving.

Uglanov Dmitry Aleksandrovich, candidate of technical science, associate professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: dmitry.uglanov@mail.ru. Area of research: work processes of heat engines and refrigerators, airborne power supplies, energy saving.

Gorshkalev Alexey Aleksandrovich, engineer of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: AGorsh@bk.ru. Area of research: work processes of heat engines.

Krasnorutskiy Alexey Sergeevich, postgraduate student of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: alex-energoaudit@mail.ru. Area of research: vortex effect and its application in engineering.

Bolshov Dmitry Vladimirovich, postgraduate student of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: heat and mass transfer, energy and resources saving.

Lapshina Varvara Aleksandrovna, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: heat and mass transfer, energy and resources saving.

Chertykovtsev Pavel Aleksandrovich, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: heat and mass transfer, energy and resources saving.