

УДК 621.431.75

ВИХРЕВАЯ ГАЗОВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

© 2011 В. В. Бирюк, И. А. Зубрилин, А. С. Красноручкий

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

Проведена оценка возможности использования комбинированных вихревых газоветроэнергетических установок для выработки электроэнергии за счёт использования энергии выхлопных газов газоперекачивающего агрегата. Спроектирована трёхмерная модель и выполнен численный расчёт статорной части газоветроэнергетической установки. Получены распределения параметров потока во всей расчётной области. Выявлена зависимость энергетической эффективности установки от статического давления на выходе из области расчёта.

Энергия ветра, газоветроэнергетическая установка, генератор вихря, газоперекачивающий агрегат, выхлопные газы, газотурбинный двигатель, математическое моделирование, поле параметров.

Дефицит топлива и возрастающее загрязнение окружающей среды отходами производств, использующих невозобновляемые источники энергии, поставили перед человечеством вопрос о применении экологически чистых, возобновляемых источников энергии, к которым относится, в том числе, и энергия ветра.

Ресурсы энергии ветра во много раз больше, чем все запасы биогенного топлива, заключённого в земной коре, и пока существует планета Земля с её газовой оболочкой, нагреваемой Солнцем и охлаждаемой полярными шапками, перемещение воздушных масс будет неисчерпаемым источником энергии.

Существующие и широко применяемые в настоящее время лопастные ВЭУ не могут уже разрешить энергетические проблемы массового потребителя (промышленности, сельского хозяйства), а также удалённых и труднодоступных регионов. Причин здесь много: малая эффективность, громоздкость, высокая стоимость в случае индивидуального использования, низкий КПД на уровне 13-20 % и др. В настоящее время повышение эффективности энергетических установок требует тщательного инженерного анализа каждого узла конструкции. Экспериментальные исследования требуют больших материальных и временных затрат.

Высокие температуры, скорости и давления, большие градиенты параметров осложняют изучение и анализ многих эффектов.

Современные САЕ-технологии существенно упрощают процесс проектирования. Сокращается время доводки изделия, снижаются материальные затраты на проведение дорогостоящих экспериментов, появляется возможность оптимизации конструкции на основе её виртуального прототипа.

Программные комплексы позволяют рассчитать и проанализировать конструкцию ещё до её изготовления, сократив тем самым процесс её доводки в реальных условиях.

На собственные нужды каждой из сотен компрессорных станций с газоперекачивающими агрегатами затрачивается около 1,5-2,5 МВт электрической мощности. Электрооснабжение обычно производится от высоковольтных линий электропередач, удалённых на расстояние в десятки и даже сотни километров. При этом потери при транспорте по линиям электропередач и трансформации потребляемой компрессорной станцией электроэнергии составляют 10-15 % и достигают в стране значительных величин порядка 150-200 МВт.

Кроме того, на всех компрессорных станциях установлены газотурбинные энергоагрегаты аварийного электроснабжения.

В условиях непрерывного роста цен на централизованно поставляемую электроэнергию, приводящего к повышению себестоимости транспорта газа, целесообразно стремиться к сокращению или даже ликвидации зависимости компрессорных станций от поставок внешней дорогой электроэнергии. Одно из возможных направлений - оснащение газотурбинных компрессорных станций высокоэкономичными газотурбинными энергоустановками собственных нужд с отказом от низкоэкономичных аварийных энергоустановок. Но этот путь потребует дополнительных капитальных затрат и связан с увеличением отбора газа из магистральных газопроводов.

Второй путь - выработка электроэнергии для обеспечения собственных нужд компрессорных станций с использованием энергии ветра. Но большинство из лопастных 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 капиталовложения 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 для обеспечения собственных нужд компрессорных станций газопроводов [1].

Более эффективны тороидальные ветроэнергетические установки. Их работа основана на получении в гиперболическом статоре закрученного воздушного потока, подобного по своим свойствам природному смерчу, обладающему 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 газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций ежесекундно выбрасывается в атмосферу несколько миллионов килограмм отработавших газов со скоростями порядка двадцати метров в секунду и с температурой до четырехсот градусов Цельсия. При этом практически не используется их значительный энергетический потенциал. Кинетическая энергия уходящих газов газоперекачивающего агрегата сравнительно невелика и практически позволяет при её использовании генерировать сравнительно небольшую электрическую мощность порядка 10-20 кВт, недостаточную для обеспечения собственных нужд компрессорной станции. В случае стремления увеличить скорости уходящих газов и их кинетическую энергию потребовалось бы уменьшать диаметры выхлопных труб газоперекачивающих агрегатов. Но при этом произойдет повышение сопротивления выхлопного тракта и снижение мощности газовых турбин газоперекачивающих агрегатов.

Представляет интерес создание новых типов энергетических установок для обеспечения собственных нужд компрессорных станций путём разработки комбинированных газоветроэлектроагрегатов смерчевого типа с вертикальной осью и возможностью эффективного использования энергетического потенциала потока отходящих газов газоперекачивающего агрегата и кинетической энергии ветра.

Принципиально газоветроэнергетическими установками могут быть оборудованы все газоперекачивающие агрегаты компрессорных станций. Тогда может быть решена проблема электроснабжения собственных нужд компрессорных станций, повышена их надёжность с отказом или значительным сокращением потребления электроэнергии из внешних высоковольтных электрических сетей. Эта проблема наиболее актуальна для компрессорных станций, находящихся за сотни километров от электростанций.

В зависимости от типа газовых турбин (расхода и температуры выхлопных газов) электрическая мощность газоветроэнергетических 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 в газоветроэнергетической установке потоков отходящих газов ГПА и атмосферного воздуха.

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 сбросного потока газов ГПА. Предварительно подкрученный поток газов, выходящий из выхлопной трубы ГПА 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 и снижение мощности ГПА. Если на периферии гиперболического статора 4 преобладает тангенциальная составляющая скорости закрученного газозвдушного потока, то в его центральной части происходит значительное увеличение осевой скорости потока.

Важно, что при увеличении скорости ветра в газоветроэнергетической уста-

новке возрастает смерчевой эффект, сопровождающийся увеличением скорости и расхода газозвдушной смеси, вызывающий повышение её мощности.

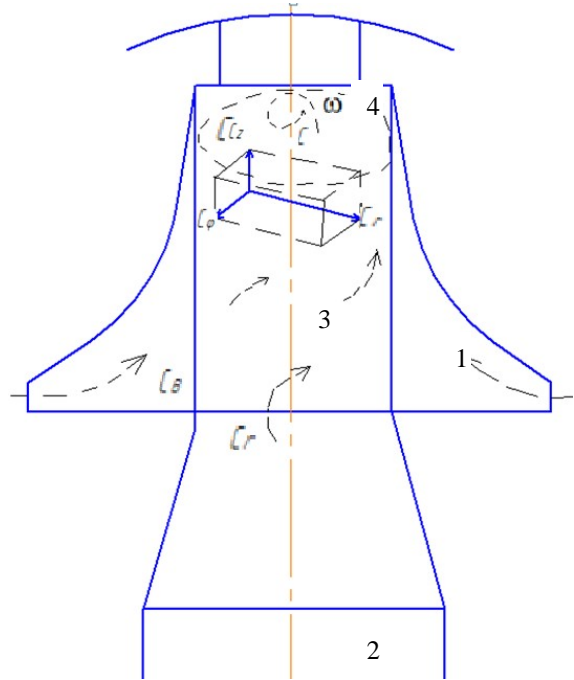


Рис. 1. Схема газозвдушных потоков в статоре установки: 1 – входной завихритель воздушного потока; 2 – выхлопная труба ГПА; 3 – осевая часть цилиндрического статора;

$C_в, C_г$ – скорости воздушного и газового потоков на входе в газоветроэнергетическую установку; C – абсолютная скорость газозвдушного потока у стенок статора;

$C_z, C_r, C_φ$ – проекции скорости C на оси координат; $ω$ – осевая скорость газозвдушного потока

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

- увеличение скорости и кинетической энергии газозвдушного потока с их использованием для выработки электроэнергии;
- увеличение массы потока, проходящего через осевую турбину;
- разбавление горячих выхлопных газов газоперекачивающего агрегата потоком воздуха, снижение температуры

сбросного потока газоздушной смеси, уменьшение в них концентрации вредных веществ, что позволяет уменьшать высоту выхлопных труб газоперекачивающих агрегатов;

– в результате появления небольшого разрежения в выхлопной трубе произойдет снижение гидравлических потерь в выхлопной системе газоперекачивающего агрегата и, как следствие, - увеличение мощности газовой турбины;

– главный положительный фактор - за счёт собственного электроснабжения производственных нужд появляется возможность повышения надёжности компрессорных станций магистральных газопроводов;

– в случае установки на газоперекачивающие агрегаты газоветроэнергетических агрегатов и сохранения принципа централизованного электроснабжения существенно снизятся затраты на покупку электроэнергии у внешних поставщиков, или же появится возможность сокращения расхода топливного газа на аварийно-резервные газотурбинные энергоагрегаты.

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 компонентов скорости потока – осевой

$V_z(r)$, радиальной $V_r(r)$ и азимутальной $V_{\varphi}(r)$.

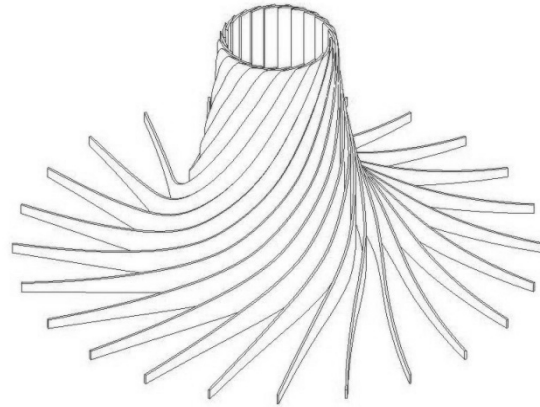


Рис. 2. Генератор закрученного потока

Условием работоспособности газоветроэнергетической установки является зависимость

$$P(r, z) + \frac{r \cdot V^2 \cdot z(\text{вылх})}{2} \geq P_{\text{атм}} \quad (1)$$

при условии, что вся энергия потока с компонентой скорости V_{φ} 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 также, что ВЭУ имеет свои границы устойчивой работы, определяемые минимальными значениями $P(r, z)$ и $V_z(r)$ [2].

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.

Так как каналы предлагаемой энергетической установки имеют специальный профиль в горизонтальной и вертикальной плоскостях, такой, что в центральную зону поступают струи, "сшивающиеся" в общий смерчеобразный вихревой поток, 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 виртуальная модель, выделена область течения, создана конечно-элементная сетка, заданы граничные условия и параметры для решения задачи.

Для проведения численного расчёта аэродинамических процессов в статорной части газовой турбины были выбраны следующие граничные условия:

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

Для удобства задания граничных условий и снятия параметров в программе ANSYS FLUENT примем в качестве единиц измерения давления 1 стандартную атмосферу (1 atm), равную 101325 Па.

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

При этом расход рабочего тела в основных расчётных зонах составляет:

Расчётные зоны	Расход рабочего тела (Mass Flow Rate), Кг/с (kg/s)
gor	0.02
vihod	0.0461
hol	0.0261

При анализе работы газовой турбины 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, а именно – его тангенциальной составляющей в различных сечениях установки.

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

Представляют интерес зависимости параметров работы газовой турбины 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 компьютерных расчётов построены зависимости параметров работы газовой турбины от величины статического давления на выходе из области расчёта (рис.3).

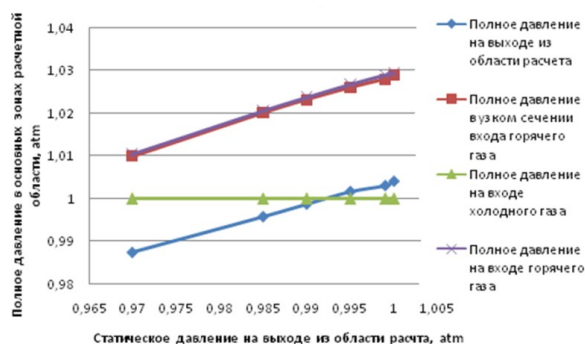


Рис. 3. Зависимость полного давления в основных зонах расчётной области от величины статического давления на выходе из области расчёта

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

$$p=G \times V_y, \tag{2}$$

где p – импульс рабочего тела; G – расход рабочего тела; V_y – вертикальная составляющая скорости рабочего тела.

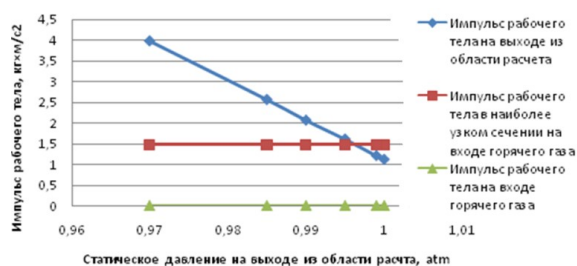


Рис. 4. Зависимость импульса рабочего тела в основных зонах расчётной области от величины статического давления на выходе из области расчёта

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

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

Итак, предполагается, что газовой ветроэнергетической установке будет применяться для электроснабжения собственных нужд компрессорных станций магистральных трубопроводов. Вихревая газовой ветроэнергетической установка предназначена для преобразования энергии ветра и исходящего из выхлопного устройства газоперекачивающего агрегата потока газа в электрическую энергию по-

стоянного тока напряжением 12 В или в энергию переменного тока – 220 В, 50 Гц.

Газовой ветроэнергетической установке имеет ряд преимуществ перед другими автономными энергетическими установками, в частности, перед дизель-генераторами. Основным достоинством её является то, что она работает на возобновляемом, экологически чистом источнике энергии – ветре.

По сравнению с другими установками, работающими от энергии ветра (карусельного и крыльчатого типа), газовой ветроэнергетической установке обладает более высокими 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] / 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.

VORTEX GAS WIND-DRIVEN POWER PLANT FOR SUPPLYING COMPRESSOR STATIONS WITH ELECTRICAL ENERGY

©2011 V. V. Biryuk, I. A. Zubrilin, A. S. Krasnorutskiy

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

The possibilities of using combined vortex gas wind-driven power plants for electric power generation by using the power of exhaust gases of a gas-transporting unit are assessed. A three-dimensional model is designed and numerical calculation of the stator part of a gas wind-driven power plant is performed. How parameter distributions in the whole design area are obtained. The dependence of the plant power efficiency on the static pressure at the design area exit is established.

Wind power, gas wind-driven power plant, whirlwind generator, gas-transporting unit, exhaust gases, gas turbine engine, mathematical modeling, 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. Область научных интересов: термодинамика.

Зубрилин Иван Александрович, инженер Научного образовательного центра газодинамических исследований, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: zubrilin416@mail.ru. Область научных интересов: процессы горения, двигатели внутреннего сгорания, процессы 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. Область научных интересов: вихревой эффект и его применение в технике.

Vladimir V. Biryuk, doctor of engineering science, professor, deputy head of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: Teplotex_ssau@bk.ru. Area of research: thermodynamics.

Ivan A. Zubrilin, engineer of Science education center of gasdynamic studies, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: zubrilin416@mail.ru. Area of research: burning processes, internal combustion engines, processes of heat exchange and diffusion, CALS- methods.

Alexei S. Krasnorutskiy, 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: Samuray63rus@mail.ru. Area of research: vortical effect and its application in engineering.