

ВЕТРОУСТАНОВКА С ВИХРЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОТОКОВ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

***Р. А. Серебряков, кандидат технических наук
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
электрификации сельского хозяйства», г. Москва, Россия
e-mail: ruds@list.ru***

Аннотация. *В проблемах преобразования солнечной и ветровой энергии, а также энергии гидроресурсов, применение закрученных ламинарных потоков способно сыграть важную роль в связи с термогидравлической особенностью этих течений, концентрирующих в вихревой струе потоки кинетической энергии, рассеянные в окружающем пространстве. Это позволяет использовать низкопотенциальные термовосходящие течения, индуцированные солнечным нагревом, слабые ветра и кинетическую энергию потоков в руслах рек и гидроканалов.*

Ключевые слова: *ветер, ветроэнергетика, вихревой эффект, вихревой ветропреобразователь, поток, сплошная среда*

Ветровой энергетический потенциал России в несколько раз превышает сегодняшние потребности страны в электроэнергии, однако, конструкционные особенности современных лопастных ветряков и низкие скорости ветров на территории России делают невозможным его использование. Для эффективной работы лопастных ветряков необходима скорость ветра более шести метров в секунду. Использование ветроустановок (ВЭУ) на базе «вихревых преобразователей потоков сплошной среды», способных использовать низкопотенциальные воздушные потоки (малые ветра), утилизированные тепловые потоки, сбрасываемые во внешнюю среду промышленными предприятиями и возможности преобразования гелио- и гелиотермальной энергии в виде термоиндуцированных восходящих струй воздуха, позволит вырабатывать электроэнергию на воздушных потоках, движущихся со скоростью от 3–4 м/с [1, 2, 3, 4]. В основе работы (и конструкции) «Вихревого преобразователя потоков сплошной среды» (ВП) – т. н. «вихревой эффект» [5, 6, 7, 8, 9, 10]. В результате многолетних исследований, с использованием аэродинамических труб ЦАГИ, был создан «задел» теоретических основ и конструкций ветроустановок нового класса, алгоритмы и методики расчета устройств, использующих «вихревой эффект», а также модели и опытные образцы.

Конструкция ВП (рис.1) содержит: входное и вытяжное устройство, направляющие аппараты (рис. 1,б), ротор (рис.1,в) и дефлектор. Установка автоматически подстраивается под реальную скорость ветра и обеспечивает преобразование энергии ветра с высокой эффективностью в широком диапазоне ветров (рис. 2) [11, 12, 13, 14].

Особенности ВП по сравнению с традиционными ветряками:

- в 1,5–2 раза меньше рабочая скорость ветра и массогабаритные параметры;
- «ротор-генератор» исключает вал, нет системы «установка на ветер»;
- конструкция предполагает её модульное исполнение из идентичных функциональных модулей (рис. 3);
- стабилизация числа оборотов ротора обеспечивается изменением входной площади воздухозаборника;
- коэффициент использования энергии ветра $\xi \approx 0,3$;
- быстроходность $Z \approx 1,5–2,0$;

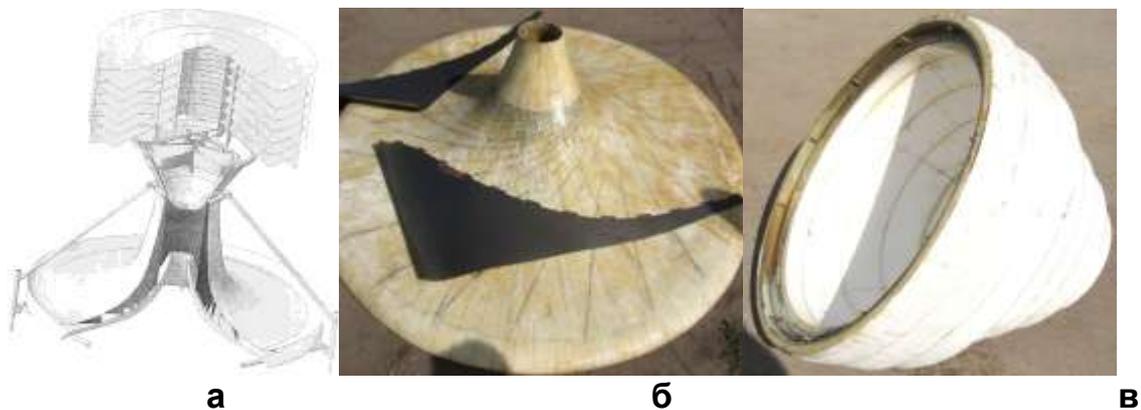


Рис. 1. Конструкция ВП:

а – общий вид; б – элемент направляющего аппарата; в – ротор

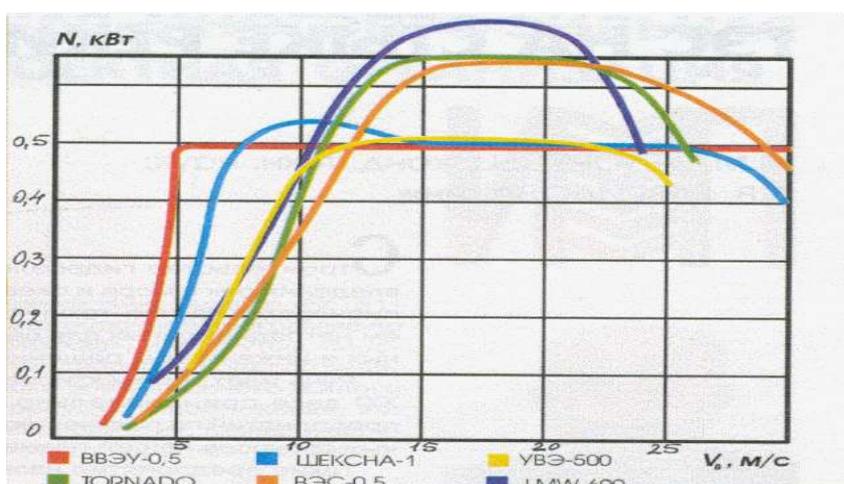


Рис. 2. Графики $N = f(V_w)$ для различных вариантов ВЭУ

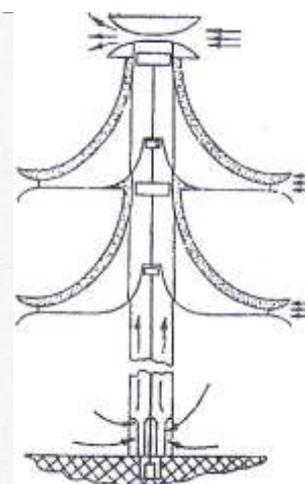


Рис. 3. Схема модульного исполнения ВП

Цель исследований – разработка ветроустановки с вихревым преобразователем потоков сплошной среды.

Материалы и методика исследований. Создание вихревых преобразователей потоков сплошной среды (ВП) основано на возможности формирования ламинарных закрученных потоков, образованных кривыми второго порядка в вертикальной плоскости и по спирали Архимеда в горизонтальной плоскости, подобных по своим свойствам природному смерчу, обладающему значительным запасом кинетической энергии [15, 16, 17].

Рассмотрим коротко физические процессы, протекающие при работе вихревого преобразователя. Круговое трехмерное осесимметричное установившееся течение вязкого, сжимаемого, теплопроводного газа описывается системой уравнений движения, сплошности, энергии и состояния, которая в цилиндрической системе координат имеет следующий вид:

Уравнение движения

$$\begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\tau^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) \\ v_r \frac{\partial v_\tau}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\tau}{\partial z} + v_r \frac{v_\tau}{r} &= \nu \left(\frac{\partial^2 v_\tau}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_\tau}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\tau}{\partial r} - \frac{v_\tau}{r^2} \right) \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

Уравнение сплошности

$$\frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho \cdot r \cdot v_z)}{\partial z} = 0$$

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} \rho \cdot C_p \cdot \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= v_r \frac{\partial p}{\partial r} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \nu \cdot \left\{ 2 \cdot \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\tau}{\partial r} + \frac{v_\tau}{r} \right)^2 \right\} - \frac{2}{3} \cdot \nu \cdot \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \end{aligned}$$

Уравнение состояния

$$p = \rho \cdot R \cdot T$$

Решая приведенные выше уравнения можно прийти к выводу, что в радиально-круговом потоке газа ни вязкость, ни сжимаемость не могут изменить закона потенциального потока (закона свободного вихря) в распределении скорости и постоянства полной температуры по радиусу.

Также известно, что устойчивость круговых потоков обеспечивается во всех случаях, когда возмущения приводят к увеличению момента количества движения на внешней границе потока или уменьшению на его внутренней границе.

Результаты исследований. Статор ВП, являющийся генератором закрученного потока (рис. 4), образован группой симметрично расположенных по окружности каналов, воспроизводящих траекторию движения воздушных струй в природных смерчах, стекающих в центральную осевую зону статора.

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.

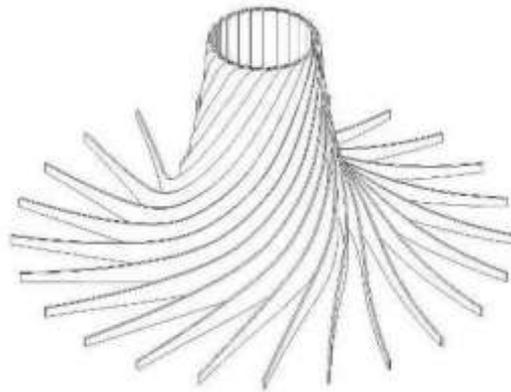


Рис. 4. Генератор закрученного потока

Вихревое движение возникает в турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа, имеющем градиент статического давления по нормали к направлению основного движения. Стоит отметить, что градиент статического давления может быть обусловлен гравитационными, инерционным, электрическим или магнитным полями.

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 определяется:

$$p^* = p(r, z) + \frac{\rho}{2} \int_0^r \overline{v_\varphi^2} dr$$

Зная давление торможения для всех сечений канала можно определить значения компонентов скорости потока – осевой $V_{zi}(r)$, радиальной $V_{ri}(r)$ и азимутальной $V_{\phi i}(r)$ (рис. 5). 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 ВП; $V_z(r)$ – 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 ВП и частично рассеивается в окружающую среду.

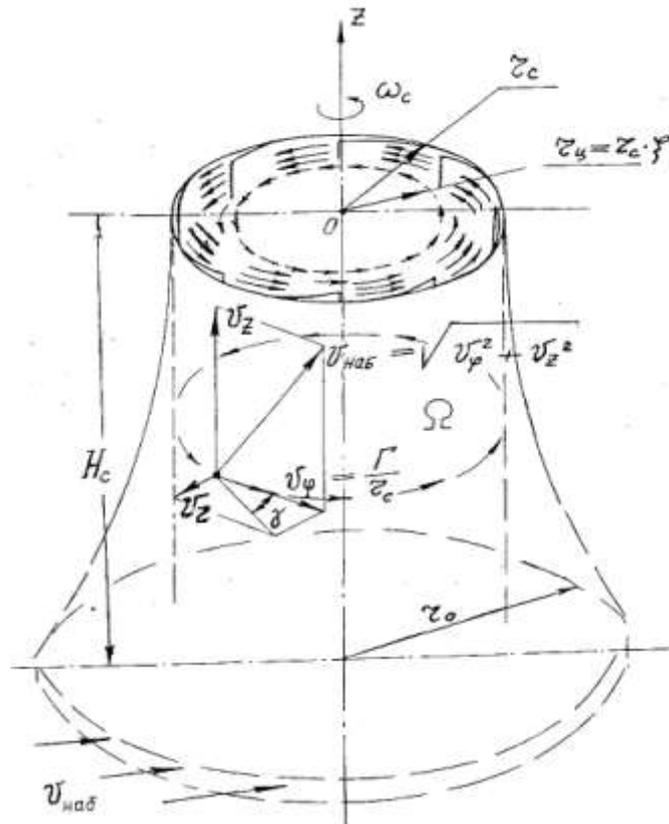


Рис. 5. Компоненты скорости потока в цилиндрической зоне статора

Условием работоспособности вихревого преобразователя является зависимость:

$$p(r, z) + \frac{\rho V_z(\text{вых})^2}{2} \geq p_{\text{атм}}$$

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

Так как каналы проектируемого ВП имеют специальный профиль (рис. 6) в горизонтальной и вертикальной плоскостях, меняющийся 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.

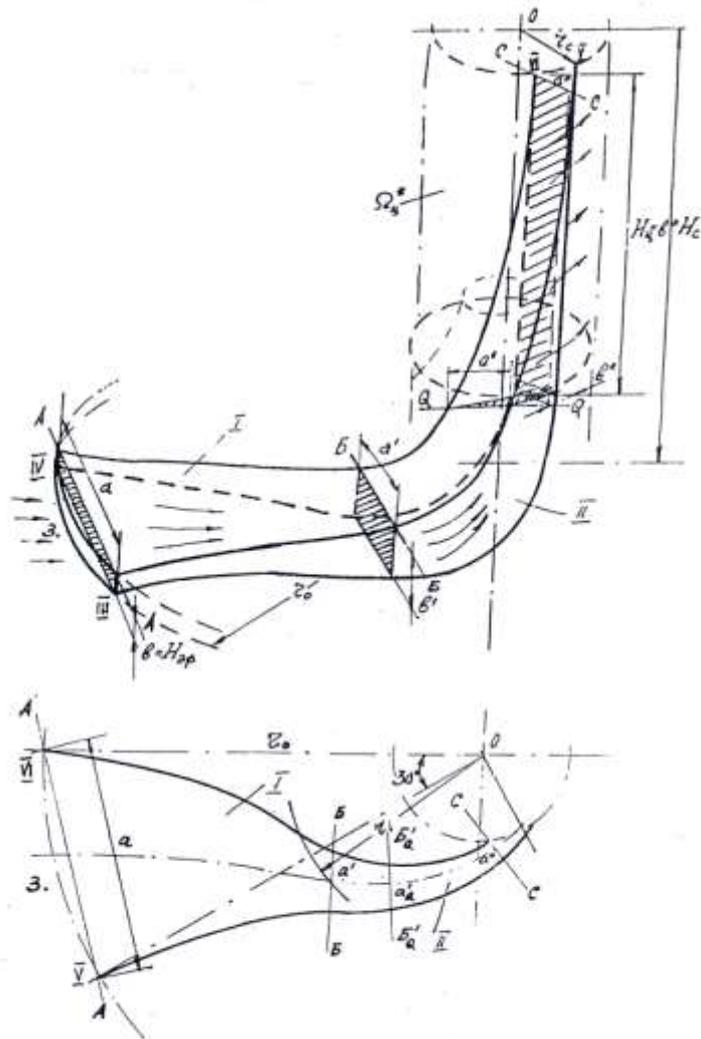


Рис. 6. Схема канала статора

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

$$\varphi_1 = \varphi_0 + [V\varphi(r)/Vr(r)] \cdot r^2c \cdot [1/r^2_1 - 1/r^2_0],$$

а в вертикальной плоскости проекции, соответствующей уравнению:

$$z_i = \frac{\text{const}}{r_i^2}$$

Условно можно в первом приближении представить вихревой преобразователь как аналог вихревой самовакумирующейся трубы. На выходе установлен ротор, а цилиндрическая зона статора выполняет функцию направляющего аппарата турбины. Таким образом, при втекании воздуха из атмосферы в зону вихреобразования через

тангенциальные направляющие каналы, в вихревой зоне возникает интенсивный круговой поток или свободный вихрь, перемещающийся в сторону выходного сечения статорной части установки. По мере осевого перемещения этот поток взаимодействует с заполняющим приосевую ось потоком эжектируемого снизу потока воздуха. За счет воздействия внешнего кругового потока, приосевой поток, являющийся вынужденным вихрем, закручивается в ту же сторону и движется в сторону выходного сечения под действием осевого градиента давления. В таблице и на рис. 7, 8, 9, 10 представлены результаты компьютерного исследования потоков сплошной среды в вихревой и периферийной зонах вихревого преобразователя [18, 19].

Результаты исследований потоков сплошной среды

| | Массовый расход воздуха, кг/с | Полное давление, Па | Скорость, м/с |
|------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------|
| На входе воздуха | 0.0051833163 | 101325 | 0.27886328 |
| На входе газа | 0.02398211 | 101773.14 | 0.2 |
| На выходе из установки | 0.029139828 | 101582.27 | 18.855532 |

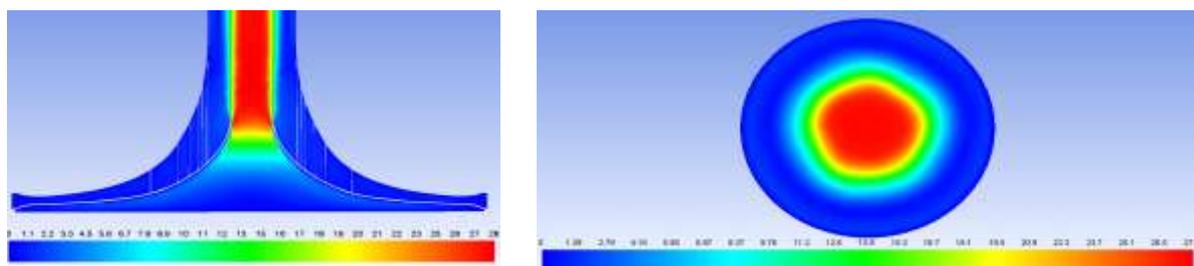


Рис. 7. Поля скоростей потоков рабочего тела на входе в статорную часть установки

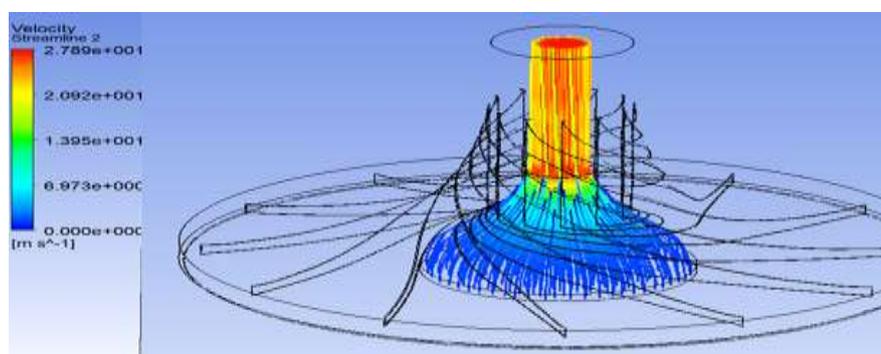


Рис. 8. Распределение скоростей рабочего тела от входа – к выходу из статорной части установки

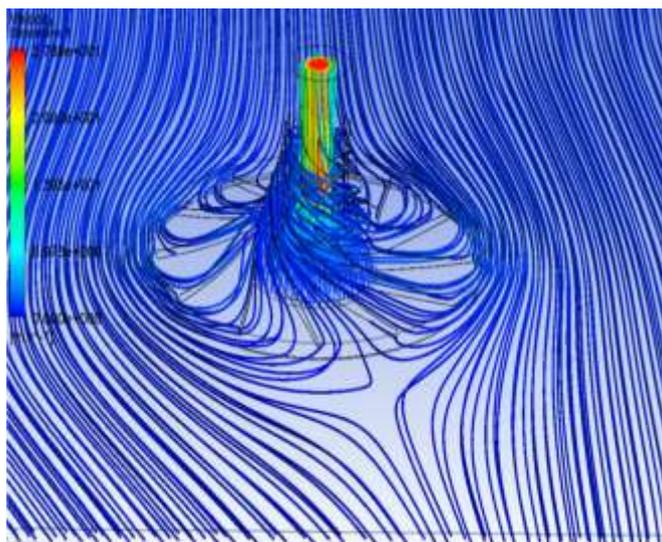


Рис. 9. Линии тока набегающего воздушного потока

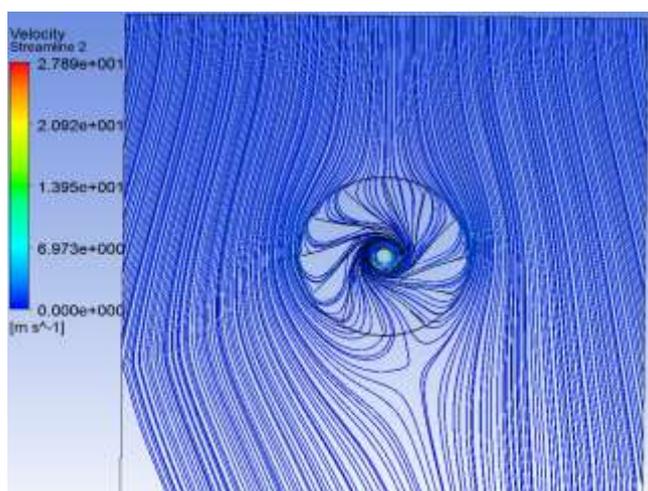


Рис. 10. Линии тока воздушного потока (вид сверху)

Выводы

В статье представлены обобщенные результаты теоретических и экспериментальных исследований вихревых преобразователей потоков сплошной среды, а также подтверждена возможность создания вихревых ветроустановок на базе Вихревых преобразователей потоков сплошной среды, способных использовать низкопотенциальные воздушные потоки, движущиеся со скоростью от 3–4 м/с и, кроме того, утилизированные тепловые потоки, сбрасываемые во внешнюю среду промышленными предприятиями.

Список литературы

1. Бирюк В. В. Вихревая ветроэнергетическая установка / В. В. Бирюк, Р. А. Серебряков // Труды 7-й Международной науч.-техн. конф.

«Энергосбережение и энергообеспечение в сельском хозяйстве». Ч. 4. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2010. – С. 248–252.

2. Бирюк В. В. Газо-ветроэнергетическая установка / В. В. Бирюк, Р. А. Серебряков, Ю. И. Цыбизов, Л. П. Шелудько // Альтернативный киловатт. – 2011. – № 5. – С. 48–51.

3. Бирюк В. В. Вихревая ветро-солнечная энергетическая установка / В. В. Бирюк, Р. А. Серебряков, В. Н. Зазимко // Альтернативная энергетика и экология.– 2013. – № 7. – С. 23–26.

4. Серебряков Р. А. Vortexeffect – vortex energy technologies / Р. А. Серебряков, В. В. Бирюк // Research in Agricultural Electric Engineering. – 2013. – V. 4, № 4. – P. 74–78.

5. Серебряков Р. А. Исследование СВТ с вращающимся диффузором / Р. А. Серебряков, В. Т. Волон // Депонировано в ВИНТИ, № 5713. – 1984. – 9 с.

6. Серебряков Р. А. Анализ возможности использования СВТ с вращающимся диффузором / Р. А. Серебряков, В. Т. Волон // Межвузовский сборник КУАИ «Аэродинамика ЛА и их систем». – 1987. – С. 134–138.

7. Серебряков Р. А. Практическое применение вихревого эффекта / Р. А. Серебряков, В. В. Бирюк // Конверсия. – 1994. – № 10. – С. 19–20.

8. Серебряков Р. А., Некоторые вопросы теории вихревой энергетики / Р. А. Серебряков // Научные труды ВИЭСХ. – 1999. – Т. 85. – С. 34–54.

9. Серебряков Р. А. Вихревая энергетика / Р. А. Серебряков // Научные труды ВИЭСХ. – 2000. – Т. 86. – С. 80–92.

10. Серебряков Р. А. Вихревая ветроэнергетическая установка / Р. А. Серебряков, В. В. Бирюк // Сб. «Ракетно-техническая техника». – Самара, 2000. – Сер. XII. – С. 43–73.

11. Серебряков Р. А. Вихревая ветроэнергетика / Р. А. Серебряков, А. Б. Калениченко // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2001. – № 11. – С. 28–29.

12. Серебряков Р. А. Энергия вихря и энергия вакуума – от теории к практике / Р. А. Серебряков, А. Б. Калениченко, А. М. Савченко, Ю. Н. Родионов // Энергетика и промышленность России. – 2003. – № 6. – С. 10–12.

13. Серебряков Р. А. Автономная ветроэнергетика / Р. А. Серебряков // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2004. – № 7. – С. 53–55.

14. Серебряков Р. А. Вихревая энергетика в энергосберегающих технологиях / Р. А. Серебряков, В. В. Бирюк, Ш. А. Пиралишвили // Сб. докл. XIX школы-семинара «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических технологиях, г. Орехово-Зуево. – М. : МЭИ, 2013. – С. 15–16.

15. Бирюк В. В. Методика расчета вихревых установок / В. В. Бирюк, Р. А. Серебряков, А. П. Толстоногов. – Самара : НТО СГАУЦ, 1992. – 96 с.

16. Краснов Ю. К. Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости / Ю. К. Краснов, Г. И. Кикнадзе // ДАН СССР. – 1986. – Т. 290, № 6. – С. 1315.

17. Пат. № 1779283 СССР. Способ формирования закрученных потоков сплошных сред / Серебряков Р. А., Олейников В. Г., Краснов Ю. К., Кикнадзе Г. И., Демченко И. Ф., Гачечиладзе И. А. – № 4885120/29 ; заявл. 25.11.1990 ; опубл. 30.11.1992, Бюл. № 44.

18. Бирюк В. В. Вихревая газоветроустановка для электроснабжения компрессорных станций / В. В. Бирюк, И. А. Красноручский // Вестник Самарского аэрокосмического университета им. С. П. Королева. – 2011. – № 5 (29). – С. 29–35.

19. Бирюк В. В. Методика расчета и анализа аэродинамических показателей газового потока в вихревой ветроэнергетической установке / В. В. Бирюк, И. А. Красноруцкий // Вестник СГАКУ им. С. П. Королева. – 2013. – № 3 (41), Ч.1. – С. 40–47.

ВІТРОУСТАНОВКА З ВИХРОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ПОТОКІВ СУЦІЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

Р. А. Серебряков

Анотація. *У проблемах перетворення сонячної та вітрової енергії, а також енергії гідроресурсів, застосування закручених ламінарних потоків здатне відіграти важливу роль у зв'язку з термогідрравлічною особливістю цих течій, які концентрують у вихровий струмінь потоки кінетичної енергії, розсіяні в навколишньому просторі. Це дає змогу використовувати низькопотенційні термовисхідні течії, індуковані сонячним нагріванням, слабкі вітри й кінетичну енергію потоків у руслах річок і гідроканалів.*

Ключові слова: *вітер, вітроенергетика, вихровий ефект, вихровий вітроперетворювач, потік, суцільне середовище*

WIND TURBINE WITH THE VORTEX CONVERTER STREAMS OF CONTINUOUS MEDIA

R. Serebryakov

Annotation. *In problems of the conversion of solar and wind energy resources, the use of twisted laminarizing flows can play important role in connection with the thermal-hydraulic characteristic of these movements, concentration in the vortex jet streams of the kinetic energy that is scattered in the surrounding space. This allows the use of low-pressure thermochimie currents induced by solar heating, a weak wind and kinetic energy flows in rivers and canals. The ability of vortex jets to concentrate in his trunk the energy scattered in the surrounding space allows, in addition to flows with high heat or high-speed potentials, to use the low-potentire flow moving in the atmosphere and waters with skorostyami 0,5 to 2 m/s, which considetably industry broadens the range of utilization of heat flow discharged into the external environment industry companies, the possibilities of transforming helioenergy as thermoinsulating ascending jets of air, energy, weak winds and a slow hydraulic flows.*

Key word: *wind, wind energy, a vortex effect, vortex converter, flow, continuous media*