



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТИХОХОДНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

A.V. Matveev, S.E. Shcheklein

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел.: (343) 375-95-08, e-mail: a.v.matveev@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 18.06.15 Заключение совета экспертов: 21.06.15 Принято к публикации: 24.06.15

В работе изложена методика и выполнен энергетический и эксергетический анализ нетто тихоходной многолопастной ветроэнергетической установки ВЭУ-5-4, получены коэффициенты энергии- и эксергии-нетто и сроки энергетической и эксергетической окупаемости для условий ряда регионов РФ. Приведенные в работе расчеты говорят о высокой эксергетической эффективности ветроэнергетических установок вследствие того, что конечным продуктом их производства является электроэнергия, в то время как на создание таких систем тратится много тепловой энергии.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, энергетический анализ нетто, срок эксергетической окупаемости, срок энергетической окупаемости, коэффициент энергии-нетто, коэффициент эксергии-нетто.

DETERMINATION OF EXERGETIC EFFICIENCY OF LOW-SPEED WIND POWER INSTALLATION

A.V. Matveev, S.E. Shcheklein

Ural Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: a.v.matveev@urfu.ru

Referred: 18.06.15 Expertise: 21.06.15 Accepted: 24.06.15

The paper sets out the methodology and made net energy and exergy analysis of the low-speed multiblade windmill WEI-5-4, the coefficients of net energy and net exergy, energy and exergy payback periods produced for the conditions of a number of regions of the Russian Federation. Calculations made in the article indicate a high exergetic efficiency of wind power plants due to the fact that the end product of their production is electricity, while the creation of such systems spent a lot of heat.

Keywords: wind power installation, net energy analysis, exergy payback period, energy payback period, coefficient of net energy, coefficient of net exergy.



Андрей Валентинович
Матвеев
Andrey V. Matveev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области за активную работу со студентами по повышению энергоэффективности и развитию новых источников энергии (2011).

Образование: УГТУ-УПИ, инженер по специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (2004).

Область научных интересов: возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, ветроэнергетика, солнечные коллекторы, паровые турбины, газопоршневые электростанции.

Публикации: более 25, в том числе 5 в реферируемых журналах.

Information about the author: Candidate of Technical Sciences, UrFU, department "Nuclear power plants and renewable energy sources" Associate Professor.

Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region for their active work with students to improve energy efficiency and the development of new energy sources (2011).

Education: Ural State Technical University with a degree in engineering, "Alternative and renewable sources of energy" (2004).

Research area: renewable energy, solar energy, wind energy, solar collectors, steam turbines, gas-fired power plant.

Publications: more than 25, including 5 in refereed journals.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey E. Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University "Atomic Stations and Renewable Energy Sources" Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including "The energoefficient house for the village", "Special systems of individual consumer solar energy supply", "The solar systems for the guarding alarm" etc.

A member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power" magazine, "Nuclear power units heat engineering" USTU article collection, "Energoeffectiveness and analysis" scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.

Введение

Одной из наиболее развитых технологий возобновляемой энергетики на сегодняшний день является ветроэнергетика. Ее принцип заключается в преобразовании кинетической энергии ветра в механическую энергию вращающегося вала с возможностью последующего преобразования ее в электрическую энергию. Ветроэнергетические установки находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности для целей как постоянного, так и аварийного энергоснабжения различных категорий потребителей.

Зачастую решение о строительстве ветроэнергетической установки принимается на основе экономического анализа проекта с точки зрения получения максимальной прибыли и минимального срока окупаемости проектов, в ряде случаев при строительстве подобных систем решающим фактором выступает их

безальтернативность, например, для энергоснабжения отдаленных ответственных потребителей в местах с высокой ветровой обеспеченностью. В дополнение к экономическому анализу сегодня все более часто можно встретить энергетический и экстернетический анализ проектов. Он показывает эффективность с точки зрения не материальных или финансовых затрат, а соотношения энергии на создание и эксплуатацию объекта с тем количеством энергии, которое будет выработано за весь жизненный цикл. Нецелесообразно создавать установку, производящую меньшее количество энергии, чем было потрачено на ее создание, если, конечно, это не вызвано острой необходимостью.

Подобного рода анализ особенно актуален для установок возобновляемой энергетики, использующих энергию солнца и ветра, поскольку данные источники отличаются стохастичностью и рассеянием энергии в пространстве. Для того чтобы собрать этот поток энергии, приходится увеличивать размер агрегатов, что

приводит к повышению материалоемкости на киловатт установленной мощности, что в свою очередь влечет рост затрат энергии и эксергии на их производство. Этот вопрос особенно остро стоит в регионах с низким энергетическим потенциалом, поскольку, например, для использования малых скоростей ветра приходится увеличивать количество лопастей ветроустановки, что приводит к повышению материалоемкости. С другой стороны, такие ветроагрегаты чаще всего имеют небольшую мощность и малую годовую производительность, что существенно влияет на срок энергетической окупаемости проекта, поэтому исследование таких объектов наиболее важно.

Теоретическая часть

Основы данного подхода заложены в работах [1-3], по данной тематике был проведен ряд исследований как в России, так и за рубежом, но большая их часть относится к установкам традиционной энергетики, использующим органическое топливо. Целью данного исследования было определение эффективности тихоходной ветроэнергетической установки в условиях различной ветровой обеспеченности с точки зрения сквозного энергетического анализа.

Энергетический и эксергетический анализ любой энергетической установки целесообразно начинать с определения границ объекта, который подвергается анализу, а также всех составных частей, входящих в этот объект или необходимых для его функционирования. Предметом исследования стала тихоходная многолопастная крыльчатая ветроэлектрическая установка ВЭУ-5-4 с горизонтальной осью вращения. Данный ветроагрегат имеет номинальную мощность 4 кВт и предназначен для работы на территориях с низкой скоростью ветра для обеспечения энергией отдельных небольших неотчетливых потребителей. Внешний вид ВЭУ-5-4 представлен на рис. 1, основные технические характеристики – в табл. 1.

Затраты энергии на создание как отдельных деталей и узлов, так и всей ветроустановки в целом оценивались по формуле

$$Q_{k\Sigma} = k_{изг} \sum_{i=1}^n \frac{m_i Q_{ki}}{k_{им}}, \quad (1)$$

где $k_{изг}$ – поправочный коэффициент, учитывающий затраты энергии на изготовление деталей, сборку, транспортировку; n – количество деталей; m_i – масса заготовки для изготовления детали; Q_{ki} – затраты энергии на производство материала заготовки; $k_{им}$ – коэффициент использования материала.

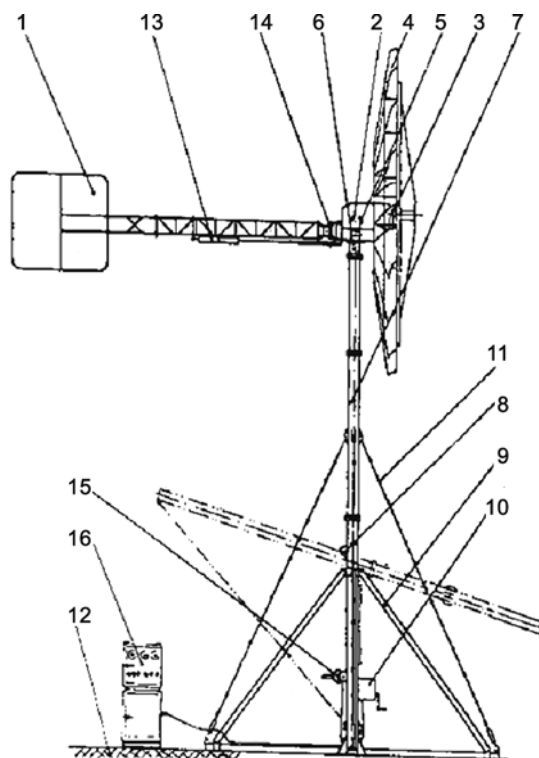


Рис. 1. Внешний вид и принципиальная схема ветроустановки ВЭУ-5-4: 1 – киль; 2 – платформа поворотная; 3 – ветроколесо; 4 – лопасти; 5 – балка боковая со щитом; 6 – опорный узел; 7 – башня; 8 – шарнир; 9 – основание; 10 – лебедка; 11 – растяжка; 12 – фундамент; 13 – механизм останова; 14 – шарнир; 15 – привод; 16 – электрооборудование (кроме установленного в поворотной платформе)

Fig. 1. The appearance and the schematic diagram of wind turbine WPI-5-4: 1 – keel; 2 – rotating platform; 3 – wind wheel; 4 – vane; 5 – bar side with a shield; 6 – the support unit; 7 – tower; 8 – hinge; 9 – base; 10 – winch; 11 – bracing; 12 – foundation; 13 – shut-off mechanism; 14 – hinge; 15 – gear; 16 – electric equipment (except installed in the rotating platform)

Таблица 1
Основные технические характеристики ВЭУ-5-4
Table 1
The main technical characteristics WPI-5-4

Параметр	Значение
Диаметр ветроколеса, м	5
Высота до оси ветроколеса, м	8,22
Число лопастей, шт.	24
Диапазон рабочих скоростей ветра, м/с	3,5-25
Расчетная скорость ветра, м/с	10
Частота вращения ветроколеса, об/мин	
рабочая	55
максимальная	100
Установ ветроколеса на ветер	с помощью килля хвостовой балки
Способ регулирования частоты вращения	вывод из-под ветра боковой балкой со щитом
Номинальная мощность генератора, кВт	4
Масса ветроагрегата, кг, не более	1500

Затраты энергии и эксергии на производство материалов, из которых сделана ветроустановка, оценивались по данным [3, 4-6]. В ходе изучения конструкторской документации завода-изготовителя были

рассчитаны энергетические и эксергетические затраты на создание заготовок для 217 различных деталей, из которых состоит ветроагрегат. Эти детали образуют 18 сборочных узлов и агрегатов, основные из них: растяжка, опора, башня, ветроколесо, основание, шарнир, киль, балка, подставка под генератор, редуктор, генератор и прочие сопутствующие изделия, кроме того, в расчете были учтены затраты на фундамент. В результате исследования конструкции ветроагрегата было установлено, что для его изготовления используется стандартный сортамент материалов, требующий минимум механической обработки, поэтому коэффициент использования материала находится на уровне 0,9. Результаты расчета энергетических затрат на создание отдельных узлов ветроагрегата ВЭУ-5-4 на основе описанной выше методики приведены на рис. 2. Общие энергетические затраты на создание установки, рассчитанные по (1), составили 98653 МДж, эксергетические затраты – 83699 МДж.

Как видно из рис. 2, самым энергоемким элементом, на который приходится 33% энергетических и эксергетических затрат, является ветроколесо. Это связано с тем, что в его конструкции в основном используется алюминий, имеющий повышенную энергоемкость. Также энергоемкими элементами являются основание и башня – 21 и 17% энергетических затрат и 20, 18% эксергетических затрат соответственно. Это связано с тем, что данные узлы имеют наибольшую массу из всех сборочных единиц, входящих в состав ветроагрегата.

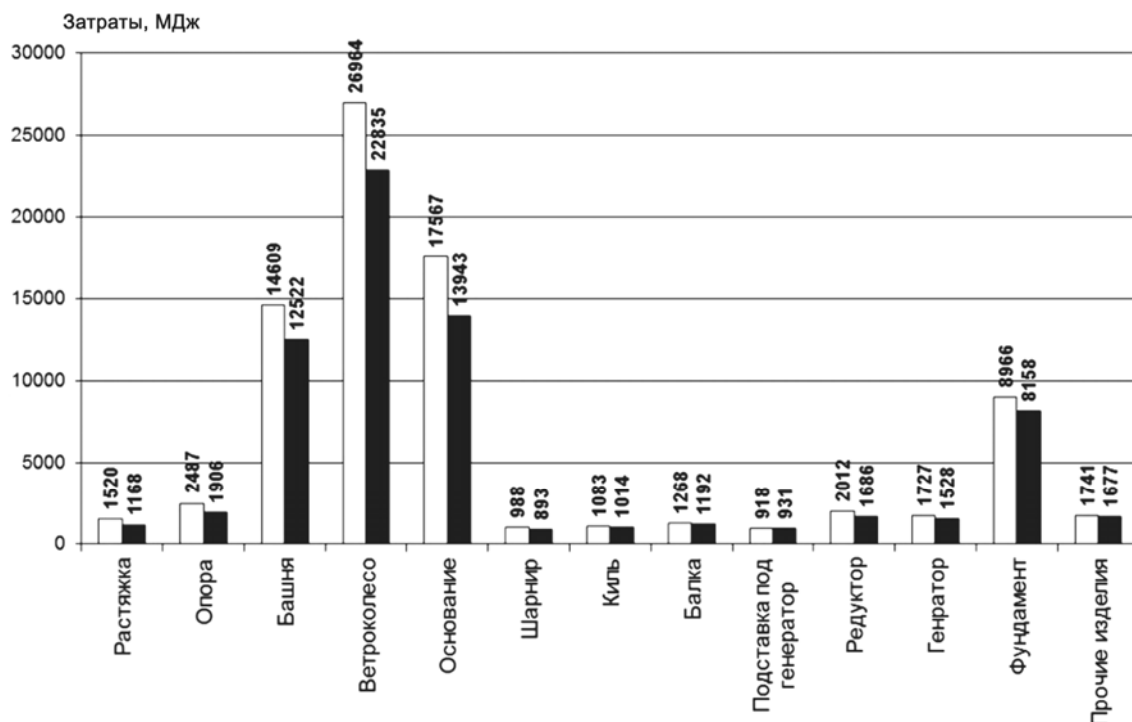


Рис. 2. Сравнение затрат энергии и эксергии на создание различных элементов ветроэнергетической установки ВЭУ-5-4
Fig. 2. Comparison of the energy and exergy costs for the creation of various elements of the wind power installation WPI-5-4

Для определения коэффициента энергии- и эксергии-нетто, а также срока энергетической и эксергетической окупаемости ветроагрегата ВЭУ-5-4 был выполнен расчет его производительности для различных условий ветровой обеспеченности по методике [7]. Ветроустановка производит электрическую энергию, которая относится к классу «безэнтропийных», т. е. может быть полностью преобразована в любой другой вид энергии, поэтому произведенная энергия равна произведенной эксергии.

Энергетическая эффективность данной установки оценивалась при помощи коэффициента энергии-нетто и эксергии-нетто по формулам

$$K_Q = Q_{\text{отв}} / Q_{k\Sigma} ; \quad (2)$$

$$K_E = E_{\text{отв}} / E_{k\Sigma} , \quad (3)$$

где $Q_{\text{отв}}$, $E_{\text{отв}}$ – энергия и эксергия, произведенная установкой за весь срок эксплуатации; $Q_{k\Sigma}$, $E_{k\Sigma}$ – энергия и эксергия, необходимые для создания установки.

Еще одним критерием, характеризующим эффективность установки, является срок энергетической и эксергетической окупаемости:

$$\tau_Q^{\text{ок}} = Q_{k\Sigma} / Q_{\text{пр}} ; \quad (4)$$

$$\tau_E^{\text{ок}} = E_{k\Sigma} / E_{\text{пр}} , \quad (5)$$

где $Q_{\text{пр}}$, $E_{\text{пр}}$ – энергетическая и эксергетическая производительность установки.

При расчетах коэффициентов энергии- и эксергии-нетто за срок службы установки, согласно [8], брался период, назначенный заводом-изготовителем, равный 10 годам. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Результаты расчетов энергетических характеристик ВЭУ-5-4

Results of calculations of energy characteristics of VPI-5-4

Таблица 2

Table 2

Параметр	Якша	Нижний Тагил	Усть-Хайрюзово	Анадырь	Ра-Из	Таганай
Средняя скорость ветра, м/с	2	3,6	5,2	6,5	7,8	10,3
Масштабный параметр A кривой распределения Вейбулла	2,4	4,2	6	7,2	8,8	12
Параметр формы k кривой распределения Вейбулла	1,47	1,45	1,29	1,6	1,31	1,68
Средняя мощность, кВт	0,33	0,98	1,61	1,97	2,24	2,95
Выработка энергии за год, МДж	10 328	30 848	50 675	62 037	70 612	93 031
Коэффициент энергии-нетто K_Q	1,05	3,13	5,14	6,29	7,16	9,43
Коэффициент эксергии-нетто K_E	1,23	3,69	6,05	7,41	8,44	11,11
Срок энергетической окупаемости $\tau_Q^{\text{ок}}$, лет	9,55	3,2	1,95	1,59	1,4	1,06
Срок эксергетической окупаемости $\tau_E^{\text{ок}}$, лет	8,1	2,71	1,65	1,35	1,19	0,9

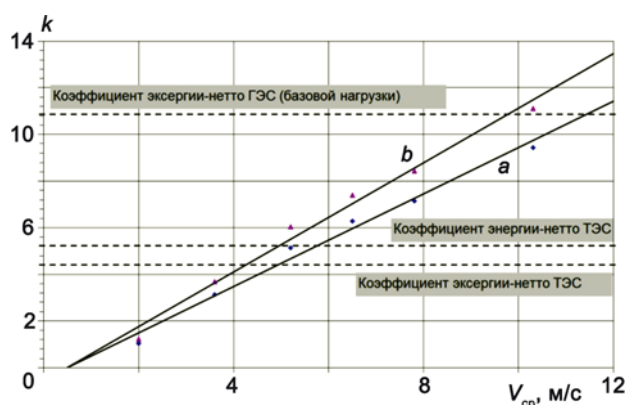


Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента энергии-нетто (а) и коэффициента эксергии-нетто (b) от средней скорости ветра
Fig. 3. The dependence of the changes in the coefficient of net energy (a), the coefficient of net exergy (b) from the mean wind speed

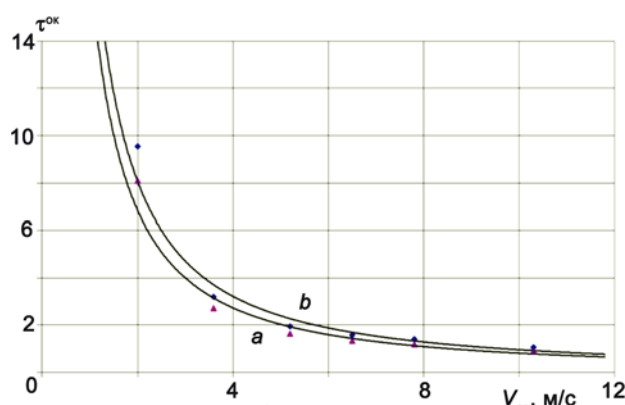


Рис. 4. Зависимость срока энергетической окупаемости (а) и эксергетической окупаемости (b) от средней скорости ветра
Fig. 4. The dependence of the energy payback period (a) and exergy payback period (b) from the mean wind speed

Эффективность ветроустановки зависит от ее местоположения. Поэтому для упрощения определения эффективности в зависимости от располагаемого потенциала результаты расчетов были аппроксимированы зависимостями (рис. 3, 4)

$$K_Q = 0,99V_{cp} - 0,49; \quad (6)$$

$$K_E = 1,17V_{cp} - 0,58; \quad (7)$$

$$\tau_Q^{ok} = 20,27V_{cp}^{-1,33}; \quad (8)$$

$$\tau_E^{ok} = 17,20V_{cp}^{-1,33}. \quad (9)$$

Заключение

Исходя из полученных расчетных данных, видно, что при средней скорости ветра на рассматриваемой территории порядка 5 м/с коэффициенты энергии- и эксергии-нетто для ветроагрегата ВЭУ-5-4 находятся на уровне аналогичных показателей для ТЭС и АЭС [3, 9, 10]. При более высоких скоростях ветра данные коэффициенты увеличиваются и начинают превышать уровень аналогичных показателей установок традиционной энергетики, достигая при средней

скорости ветра 9,9 м/с уровня коэффициента эксергии-нетто гидроэлектростанций, обеспечивающих базовую нагрузку, имеющих самое высокое значение данного коэффициента [3].

В процессе изготовления ветроустановки использовалась тепловая энергия, которая относится к так называемой «энтропийной» группе. Ветроагрегат, в свою очередь, производит электрическую энергию, которая относится к «безэнтропийной» группе [3]. Исходя из этого, энергетические затраты на производство ВЭУ-5-4 превышают эксергетические, и коэффициент эксергии-нетто при одной и той же ветрообеспеченности оказывается выше коэффициента энергии-нетто.

Сроки энергетической и эксергетической окупаемости для условий рассматриваемых метеостанций изменялись в пределах от 1,06 до 9,55 и от 0,9 до 8,10 года соответственно. При средней скорости ветра на территории более 3,6 м/с срок энергетической окупаемости не превышает 3,20 года, что является высоким показателем. Улучшить энергетические характеристики ветроагрегата ВЭУ-5-4 можно, например, путем замены материала ветроколеса с алюминия на углеродистую сталь или стеклопластик с внесением соответствующих изменений в конструкцию.

Список литературы

1. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994.
2. Янговский Е.И. Потоки энергии и эксергии. М.: Наука, 1988.
3. Бродянский В.М., Верховкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем. Киев: Наук. думка, 1991.
4. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Розин С.Е., Дружинина О.Г., Пареньков А.Е. Энергетический анализ. Методика и базовое информационное обеспечение: учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001.
5. Исакович Г.А., Слудкин Ю.Б. Экономия топливно-энергетических ресурсов в строительстве. М.: Стройиздат, 1988.
6. Панченко Г.Г., Коробко Б.П. Энергоемкость заготовок деталей машин // Новое в науке, технике, производстве: Обзорная информация для руководителя. Серия: Промышленная энергетика и энергосбережение. Киев, НИИНТИ, вып. 11990.
7. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. М.: Можайск-Терра, 2000.
8. ГОСТ Р 51991-2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.
9. Алексеев В.В. Экология и экономика энергетики глазами эколога. М.: Знание, 1990.
10. Иванов Г.А., Волошин Н.П., Ганеев А.С., Крупин Ф.П., Литвинов Б.В., Кузьминых С.Ю., Свалухин А.И., Шибаршов Л.И. Взрывная дейтериевая энергетика. Снежинск, 1996.

References

1. Stepanov V.S., Stepanova T.B. Èffektivnost' ispol'zovaniâ ènergii. Novosibirsk: VO «Nauka», Sibirskaa izdatel'skaa firma, 1994.
2. Ântovskij E.I. Potoki ènergii i èksergii. M.: Nauka, 1988.
3. Brodânskij V.M., Verhivker G.P., Karčev Â.Â. i dr. Èksergetičeskie rasčety tehničeskikh sistem. Kiev: Nauk. dumka, 1991.
4. Lisienko V.G., Šelokov Â.M., Rozin S.E., Družinina O.G., Paren'kov A.E. Ènergetičeskij analiz. Metodika i bazovoe informacionnoe obespečenie: učebnoe posobie. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2001.
5. Isakovič G.A., Sluckin Ū.B. Èkonomiâ toplivno-ènergetičeskikh resursov v stroitel'stve. M.: Strojizdat, 1988.
6. Pančenko G.G., Korobko B.P. Ènergoemkost' zagotovok detalей mašin // Novoe v nauke, tehnike, proizvodstve: Obzornaâ informaciâ dlâ rukovoditelâ. Seriâ: Promyšlennaâ ènergetika i ènergobereženie. Kiev, NIINTI, vyp. 11990.
7. Starkov A.N., Landberg L., Bezrukih P.P., Bo-risenko M.M. Atlas vetrov Rossii. M.: Možajsk-Terra, 2000.
8. GOST R 51991-2002 Netradicionnaâ ènergetika. Vetroènergetika. Ustanovki vetroènergetičeskie. Obšie tehničeskie trebovaniâ.
9. Alekseev V.V. Èkologiâ i èkonomika ènergetiki glazami èkologa. M.: Znanie, 1990.
10. Ivanov G.A., Vološin N.P., Ganeev A.S., Krupin F.P., Litvinov B.V., Kuz'minyh S.Ū., Svaluhin A.I., Šibaršov L.I. Vzryvnaâ dejterievaâ ènergetika. Snežinsk, 1996.

Транслитерация по ISO 9:1995

