

УДК 330.13: 621.311.23

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Маслеева О.В., Агальцова Т.А., Пачурин Г.В.

ФБГУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: pachuringv@mail.ru

Выбор источника энергии обычно проводится на основе технического, экономического и экологического сравнения различных рассматриваемых альтернативных вариантов. Возобновляемые источники энергии могут обеспечить в процессе производства электроэнергии сокращение уровня загрязнения окружающей природной среды. В данной работе приведены результаты экономических исследований сравнительных вариантов оценки жизненного цикла ветровой, солнечной электростанций и мини-ГЭС с установленной мощностью 30 кВт, предлагаемых для эксплуатации в Нижегородской области. Они включают затраты на проектные работы, на строительные-монтажные работы, стоимость оборудования, затраты на техническое обслуживание оборудования и утилизацию оборудования. Показано, что оценку затрат жизненного цикла возобновляемых источников энергии можно использовать для технико-экономического обоснования проекта с целью рационального использования затрат на электроэнергию. Для Нижегородской области с учетом климатических условий наиболее выгодным вариантом является применение мини-ГЭС.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, оценка жизненного цикла, экономическая эффективность, экологичность производства электроэнергии

ECONOMIC EVALUATION OF THE LIFE CYCLE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Masleeva O.V., Agaltsova T.A., Pachurin G.V.

Nizhny Novgorod State Technical University R.A. Alekseeva, Nizhny Novgorod,
e-mail: pachuringv@mail.ru

The choice of energy source is usually carried out on the basis of technical, economic and ecological comparison of the various alternatives under consideration. Renewable energy sources can reduce the level of environmental pollution in the process of electricity production. In this paper, we present the results of economic studies of comparative options for assessing the life cycle of wind, solar power stations and mini-HPPs with an installed capacity of 30 kW, offered for operation in the Nizhny Novgorod region. They include the costs of design work, construction and installation work, the cost of equipment, the costs of maintenance of equipment and the disposal of equipment. It is shown that an estimate of the life cycle costs of renewable energy sources can be used for the feasibility study of the project with the goal of rational use of electricity costs. For the Nizhny Novgorod region, taking into account climatic conditions, the most advantageous option is the use of a mini-HPP.

Keywords: renewable energy sources, life cycle assessment, economic efficiency, environmental friendliness of electricity generation

При выборе источника энергии проводится техническое, экономическое и экологическое сравнение различных рассматриваемых вариантов [10, 11]. Применение возобновляемых источников энергии может служить повышению экологичности процессов производства электроэнергии [2].

Возобновляемые источники энергии в процессе эксплуатации не являются источниками загрязнения атмосферного воздуха, водоемов и почвы, а также не выбрасывают парниковые газы [12].

Для комплексной экологической оценки источников энергии необходимо учитывать весь жизненный цикл, начиная с добычи и транспортировки природных ресурсов, процесса производства энергоустановок и заканчивая процессом их утилизации.

При экономической оценке жизненного цикла возобновляемых источников энергии необходимо учитывать следующие со-

ставляющие [5]: стоимость оборудования; затраты на проектные работы; затраты на строительные-монтажные работы; затраты на техническое обслуживание оборудования; затраты на охрану окружающей среды; затраты на утилизацию оборудования.

Поскольку возобновляемые источники энергии не являются источниками загрязнения окружающей среды в процессе эксплуатации [4, 11], составляющая расходов на охрану окружающей среды принята равной нулю.

В данной работе приведены результаты экономических исследований сравнительных вариантов оценки жизненного цикла ветровой, солнечной электростанции [9] и мини-ГЭС [8] установленной мощностью 30 кВт, предлагаемых для эксплуатации в Нижегородской области. Исходные данные для экономических расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики энергоустановок АИЭ и аккумуляторов

Показатели	Мини-ГЭС	Солнечная (СЭУ)	Ветровая (ВЭУ)
Марка ЭУ	ИНСЭТ Пр 30	Saana 250 LM3 MBW 120 шт.	Муссон
Марка аккумулятора	–	Volta ST-200 13 шт.	Volta ST-200 13 шт.
Мощность номинальная, кВт	30	30	30
Мощность фактическая, кВт	30	3,37	1,2
Срок службы, лет	20	20	20
Произведено электроэнергии, кВт×ч/год	262800	29520	10512
Произведено электроэнергии всего, кВт×ч	5256000	590400	210240

Расчет производства электроэнергии солнечными установками с учетом годовой суммы солнечной радиации, площади солнечных батарей и их КПД был выполнен в работе [6]. Для ветровых установок учитывали фактическую скорость ветра и КПД установки [6].

Мини-ГЭС

Экономическая эффективность использования микроГЭС зависит от приведенных годовых затрат на производство 1 кВт и определяются по выражению [3]:

$$3 = \frac{R_n K + C}{P}, \quad (1)$$

где R_n – нормативный коэффициент рентабельности;

K – общие капиталовложения, руб.;

C – общие годовые эксплуатационные расходы, руб.;

P – установленная мощность объекта электроснабжения, кВт.

Нормативный коэффициент рентабельности определяется по формуле

$$R_n = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

где T – экономический срок службы оборудования, лет.

Общие капиталовложения исчисляются по формуле

$$K = K_{уст} + K_{пр} + K_{стр}, \quad (3)$$

где $K_{уст}$ – стоимость комплектного оборудования, руб.;

$K_{пр}$ – стоимость проектных работ по определению места установки станции на местности, руб.;

$K_{стр}$ – стоимость строительных и монтажных работ по установке электростанции, руб.

Капитальные затраты зависят от мощности электростанции. Для микроГЭС мощностью от 10 до 50 кВт они составляют $K_{уст.уд} = 20$ тыс руб./кВт.

Исходя из установленной мощности и удельной стоимости полная стоимость оборудования микроГЭС составляет

$$K_{уст} = K_{уст.уд} \times P, \quad (4)$$

Стоимость проектных работ, которые включают в себя определение места установки станции на местности, определяется минимальным размером оплаты труда:

$$K_{пр} = 50 \times \text{МРОТ}, \quad (5)$$

где МРОТ в Нижегородской области в соответствии с региональным соглашением о минимальной заработной плате в Нижегородской области на 2016 год от 27 октября 2015 г. № 696/304/А-516 составляет 9 000 руб.

Стоимость строительных и монтажных работ зависит от установленной мощности микроГЭС и среднего уклона реки. В расчетах использовали следующие значения коэффициентов:

– $K_p = 0,05$ коэффициент затрат на установку станции;

– $K_n = 0,5$ коэффициент, учитывающий влияние уклона русла ($\Delta H < 1,0$ м/км) реки на затраты по установке станции в зависимости от среднего уклона русла реки (κ_H):

Стоимость строительных и монтажных работ по установке станции определяется по формуле

$$K_{стр} = \kappa_p \kappa_n K_{уст}, \quad (6)$$

Общие годовые эксплуатационные расходы определяются по формуле

$$C = C_{экс} + C_{рем}, \quad (7)$$

где $C_{экс}$ – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения, руб.;

$C_{рем}$ – годовые расходы на плановый ремонт, руб.

Срок службы оборудования микроГЭС, по данным компании-изготовителя, составляет 15 лет. Работа микроГЭС полностью автоматизирована и не требует присутствия

человека. Поэтому эксплуатационные расходы включают периодический осмотр оборудования, его чистку и смазку. Эксплуатационные расходы не зависят от мощности и определяются величиной минимального размера оплаты труда:

$$C_{\text{экс}} = 36 \times \text{МРОТ}. \quad (8)$$

Затраты на ремонт зависят от стоимости установки и стоимости строительных и монтажных работ:

$$C_{\text{рем}} = \kappa_{\text{рем}} R_{\text{н}} (K_{\text{уст}} + K_{\text{стр}}), \quad (9)$$

где $\kappa_{\text{рем}} = 0,2$ коэффициент затрат на ремонт.

Используя вышеприведенную методику, рассчитаем критерии эффективности использования микроГЭС на реке Ветлуга Нижегородской области. Скорость течения реки Ветлуга составляет на разных участках от 0,5 до 1 м/сек. Уклон русла реки 0,2 м/км. Из табл. 2 выберем тип микрогидроэлектростанции – МикроГЭС 50Пр (мощность 30 кВт).

Используя формулу (2), определим нормативный коэффициент рентабельности:

$$R_{\text{н}} = 1/15 = 0,067.$$

По формуле (4) определим стоимость комплектного оборудования:

$$K_{\text{уст}} = 20\,000 \times 30 = 600\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость проектных работ по определению места установки станции на местности по формуле (5):

$$K_{\text{пр}} = 50 \times 9\,000 = 450\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость строительных и монтажных работ по установке станции по выражению (6):

$$K_{\text{стр}} = 0,05 \times 0,5 \times 600\,000 = 15\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, капитальные затраты составят

$$K = 600\,000 + 450\,000 + 15\,000 = 1\,065\,000 \text{ руб.}$$

Рассчитаем годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения по формуле (8):

$$C_{\text{экс}} = 36 \times 9\,000 = 324\,000 \text{ руб.}$$

Величина затрат на ремонт определяется по формуле (9):

$$C_{\text{рем}} = 0,2 \times 0,067 \times (600\,000 + 15\,000) = 8\,241 \text{ руб.}$$

Следовательно, годовые эксплуатационные расходы:

$$C = 324\,000 + 8\,241 = 332\,241 \text{ руб.}$$

Приведенные годовые затраты на 1 кВт установленной мощности:

$$3 = \frac{0,067 \times 1065000 + 332241}{30} = 13\,453 \text{ руб.}$$

Себестоимость 1 кВт×ч электроэнергии:

$$S_3 = \frac{R_{\text{н}} K + C}{W}, \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}, \quad (10)$$

где W – объем электроэнергии, произведенный за года, кВт×ч.

$$S_3 = \frac{0,067 \times 1065000 + 332241}{262800} =$$

$$= 1,5 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч.}$$

Экономические составляющие жизненного цикла работы мини-ГЭС приведены в табл. 2 и на рис. 1. Как видно из рис. 1, основные расходы приходятся на проектные работы и покупку оборудования.

Солнечные электростанции

Для того чтобы оценить целесообразность установки солнечных батарей, рассчитаем экономическую эффективность их использования.

Стоимость оборудования:

1) солнечные батареи 120 шт. по 16 000 руб.;

2) аккумуляторы 13 шт. по 27 000 руб.;

3) гибридный трехфазный инвертор *InfiniSolar 10kW* – 3 шт. по 324 060 руб.

Таким образом, капитальные затраты на приобретение будут следующие:

$$K_{\text{уст}} = 120 \times 16\,000 + 13 \times 27\,000 + 3 \times 324\,060 = 3\,243\,180 \text{ руб.}$$

Стоимость проектных работ по определению места установки станции на местности составляет 3% от стоимости установки: $K_{\text{пр}} = 0,03 \times 1\,920\,000 = 57\,600 \text{ руб.}$

Стоимость монтажа солнечных электростанций составляет 20–30% от общей стоимости оборудования, то есть

$$3\,243\,180 \times 0,2 = 648\,636 \text{ руб.}$$

Всего капитальные затраты:

$$K = 3\,243\,180 + 57\,600 + 648\,636 = 3\,949\,416 \text{ руб.}$$

Средняя выработка электроэнергии составит 29520 кВт·ч/год для Нижнего Новгорода. Максимальная тарифная ставка 6 руб. 88 коп. за 1 кВт·ч электроэнергии для жителей Нижнего Новгорода и Нижегородской области в соответствии с решением региональной службы по тарифам Нижегородской области № 58/3 от 29.12.2016 «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей Нижегородской области на 2017 год».

Таблица 2

Экономические показатели работы возобновляемых источников энергии, руб.

Показатели	Мини-ГЭС	СЭУ	ВЭУ
Полные затраты, всего	1 397 241	3 981 848	2 748 340
Капитальные затраты, в том числе:	1 065 000	3 949 416	2 727 830
– проектные работы	450 000	57 600	61 530
– стоимость оборудования	600 000	3 243 180	2 051 000
– затраты на установку и монтаж	15 000	648 636	615 300
Эксплуатационные расходы	332 241	32 432	20 510
Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии	1,5	7,8	13,0
Утилизация ЭУ	31 400	106 743	69 211

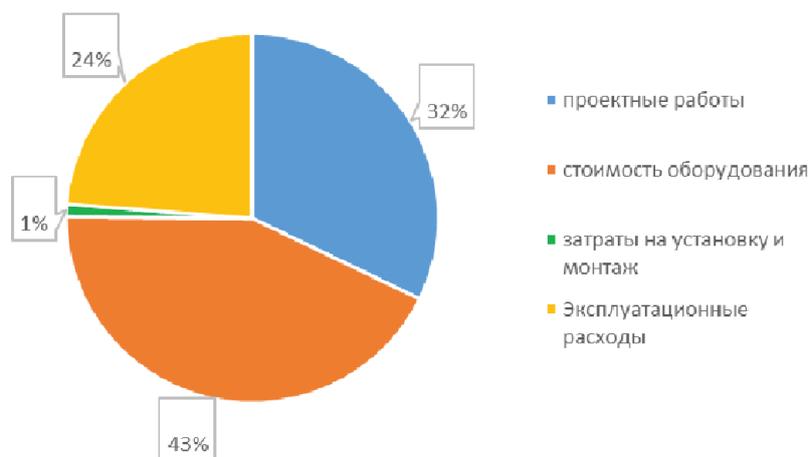


Рис. 1. Экономические составляющие жизненного цикла работы мини-ГЭС

За год экономия от использования составит:

$$6,88 \times 29520 = 203\,098 \text{ руб.}$$

Чтобы оценить экономическую выгоду от установки комплекта солнечных батарей, примем расчетный период 20 лет.

Годовую экономию денежных средств за расчетный период определим по функции сложного процента по формуле

$$S = P(1 + i_c)^n, \quad (11)$$

где S – экономическая выгода от использования денежных средств за расчетный период, приведенная к текущей стоимости, руб.; P – экономическая выгода от использования денежных средств в первый год службы, руб.; n – расчетный период, лет; i – средний рост тарифных ставок на электроэнергию в Нижегородской области в год.

$$S = 203098 \sum_{t=1}^{20} (1+0,08)^t = 10033042 \text{ руб.}$$

Следовательно, за 20 лет службы комплект солнечных батарей в переводе на текущую стоимость принесет 10 033 042 руб.

Расчет затрат на замену комплектующих частей. Средний срок службы аккумуляторов 7 лет, а инвертера – 13 лет, так как ставка рефинансирования равна 10%. Таким образом, затраты за замену устаревших частей будут составлять:

$$3 = 351\,000 \times (1 + 0,1)^7 + 972\,180 \times (1 + 0,1)^{13} = 4\,038\,471 \text{ руб.}$$

Расчет результата от использования солнечных батарей:

$$R = 10\,033\,042 - 3\,949\,416 - 4\,038\,471 = 2\,045\,155 \text{ руб.}$$

Себестоимость электрической энергии, производимой СЭУ [13]:

$$S_{\text{СЭУ}} = \frac{K + I_{\text{экс}} \cdot T_{\text{сл}}}{W_{\text{СЭУ}} \cdot T_{\text{сл}}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{экс}}$ – ежегодные эксплуатационные расходы СЭУ, руб.; $W_{\text{СЭУ}}$ – ежегодная выработка СЭУ, кВт·ч; $T_{\text{сл}}$ – срок службы, лет.

Эксплуатационные расходы СЭУ определяются в долях от общей стоимости установки, примем норму равной 1%, следовательно, $I_{\text{экс}} = 0,01 \times 243\,180 = 32\,432 \text{ руб.}$

Тогда себестоимость электрической энергии, производимой СЭУ

$$S_{\text{СЭУ}} = \frac{3949416 + 32432 \cdot 20}{29520 \cdot 20} = 7,8 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч.}$$

Экономические показатели жизненного цикла работы солнечных электростанций приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Как видно из рис. 2, основные расходы приходятся на покупку оборудования.

Ветровые электростанции

Экономическая эффективность использования ВЭУ для энергоснабжения небольших потребителей определяется имеющимся ветроэнергетическим потенциалом, тарифом на электроэнергию у потребителя, стоимостью, используемой ВЭУ, техническими условиями на подключение и рядом других факторов [1].

Ветрогенератор Муссон 30 кВт разработан для электроснабжения небольших производственных или групп индивидуальных потребителей. Номинальная мощность 30 кВт достигается при ветрах от 13,5 м/с. Эта установка предназначена для работы совместно с мотор-генератором или сетью и позволяет экономить на топливе (моторесурсе или тарифах) до 80 % средств [7].

Экономический потенциал представляет собой энергию, которая может быть выработана в год ВЭУ при условии, что экономический эффект будет положительным: $\Delta > 0$.

Для анализа этого условия потребуется определить срок службы установки и срок окупаемости и сравнить их. Срок службы ВЭУ определен производителем в 20 лет.

Нижний Новгород находится в зоне централизованного энергоснабжения, значит, срок окупаемости при внедрении ветроагрегата может быть определен по формуле [13]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{N_p C}{W_{\text{ВЭУ}} \cdot C_{\text{т}} - I_{\text{экс}}}, \quad (13)$$

где $N_p C$ – общая стоимость установки (капитальные затраты), руб.;

$W_{\text{ВЭУ}} = \langle N \rangle T$ – электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ за год, кВт×ч;

$C_{\text{т}}$ – стоимость энергии традиционного источника, руб./кВт×ч;

$I_{\text{экс}}$ – издержки эксплуатации, руб./кВт×ч;

Стоимость оборудования:

1) ВЭУ мощностью 30 кВт – 1 700 000 руб.;

2) аккумуляторы 13 шт. по 27 000 руб.

Таким образом, капитальные затраты на приобретение будут следующие:

$$K_{\text{уст}} = 1\,700\,000 + 13 \times 27\,000 = 2\,051\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость проектных работ по определению места установки станции на местности составляют 3 % от стоимости установки: $K_{\text{пр}} = 0,03 \times 2\,051\,000 = 61\,530 \text{ руб.}$

Стоимость монтажа ВЭУ зависит от многих факторов (удаленность объекта, ландшафт, наличие сильного ветра (порывы свыше 10 м/с), наличие или отсутствие крана, время года, погода, накладные расходы монтирующей организации, высота мачты, количество подключаемого электрооборудования и т.д.) и составляет ориентировочно 30–40 % от стоимости ветроэнергетической установки.

Следовательно, стоимость монтажа ВЭУ: $2\,051\,000 \times 0,3 = 615\,300 \text{ руб.}$

Капитальные затраты:

$$K = 2\,051\,000 + 61\,530 + 615\,300 = 2\,727\,830 \text{ руб.}$$



Рис. 2. Экономические составляющие жизненного цикла работы солнечных электростанций

Затраты эксплуатации определяются в долях от общей стоимости установки, примем норму равной 1%, следовательно, $I_{\text{экс}} = 0,01 \times 2\,051\,000 = 20\,510$ руб.

Стоимость энергии, вырабатываемой ВЭУ руб./кВт·ч, связана со сроком службы установки соотношением

$$C = \frac{N_p C + I_{\text{экс}} \cdot T_{\text{сл}}}{W_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{сл}}}, \quad (14)$$

где $T_{\text{сл}}$ – срок службы, лет.

$$C = \frac{2727830 + 20510 \cdot 20}{10512 \cdot 20} = 13 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч.}$$

Экономические показатели жизненного цикла работы ветровых электростанций

приведены в табл. 2 и на рис. 3. Как видно из рис. 3, основные расходы приходятся на покупку оборудования.

После вывода из эксплуатации энергоустановки ее можно сдать в металлолом. Денежные средства, полученные за утилизацию материалов, из которых состоят электростанции, приведены в табл. 3 (цена металлолома в феврале 2017 г.). Средства, полученные за утилизацию электрооборудования, не суммировали с затратами жизненного цикла, поскольку эта сумма будет получена через 15–20 лет.

Все итоговые результаты экономических расчетов для возобновляемых источников энергии при оценке их жизненного цикла сведены в табл. 2 и представлены на рис. 4.



Рис. 3. Экономические составляющие жизненного цикла работы ветровых электростанций

Таблица 3

Денежные средства, полученные за утилизацию материалов ЭУ

Вид ЭУ	Масса, кг	Цена, руб./кг	Цена, руб.	Итого, руб.
Мини-ГЭС	сталь 1962 кг	10	19 620	19 620 + 11 780 = 31 400
	медь 38 кг	310	11 780	
Солнечная (СЭУ)	сталь 6000 кг	10	60 000	60 000 + 19 872 + 26 871 = 106 743
	алюминий 276 кг	72	19 872	
	аккумулятор 39 кг × 13 шт. = 507 кг	53	26 871	
Ветровая (ВЭУ)	сталь 3056 кг	10	30 560	30 560 + 11 780 + 26 871 = 69 211
	медь 38 кг	310	11 780	
	аккумулятор 39 кг × 13 шт. = 507 кг	53	26 871	

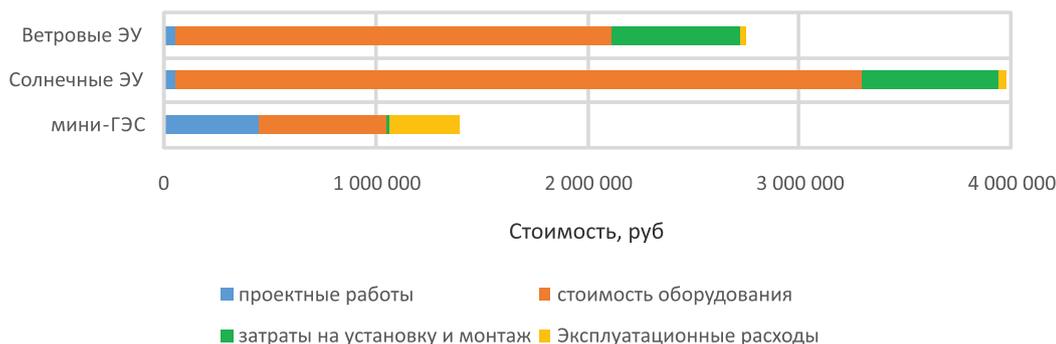


Рис. 4. Экономические составляющие жизненного цикла работы возобновляемых источников энергии

Выводы

- затраты жизненного цикла возобновляемых источников энергии возможно использовать для технико-экономического обоснования проекта с целью рационального использования затрат на электроэнергию;
- для Нижегородской области с учетом климатических условий наиболее выгодным вариантом из рассматриваемых возобновляемых источников энергии является применение мини-ГЭС;
- ветровые электростанции имеют низкие экономические показатели из-за низкого ветрового потенциала Нижегородской области;
- солнечные электростанции имеют низкие экономические показатели высокой стоимости оборудования и невысокого солнечного потенциала Нижегородской области.

Список литературы

1. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения. – Краснодар: Б/И. – 2001. – 333 с.
2. Дудникова Л.В., Маслеева О.В., Курагина Т.И., Пачурин Г.В. Повышение экологической безопасности объектов тепло- и электроснабжения предприятия // Современные проблемы науки и образования. – 2010. – № 1. – С. 113–118.
3. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 187 с.
4. Маслеева О.В., Пачурин Г.В. Экологическая и экономическая целесообразность использования биотоплива // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6-1. – С. 139–144.

5. Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Головкин Н.Н. Экологическая и экономическая оценка использования мини-ТЭЦ, работающих на природном и биогазе // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 1. – С. 86–92.

6. Маслеева О.В., Воеводин А.Г., Пачурин Г.В. Тепловое воздействие альтернативных источников на окружающую среду / Современные наукоёмкие технологии. – 2015. – № 3. – С. 51–54.

7. Сайт компании «ЛарРус» <http://www.ctc-3c.ru/musson.html>.

8. Сайт межотраслевого научно-технического объединения «ИНСЭТ» <http://www.inset.ru>.

9. Солнечные батареи, автономные системы электроснабжения Multiwood <http://www.multiwood.ru/pv/S250LM3MBW>.

10. Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Филатов Д.А. Акустическое воздействие мини-ТЭЦ с газопоршневыми и дизельными двигателями на окружающую среду // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 4. – С. 126–128.

11. Пачурин Г.В. Экологическая оценка возобновляемых источников энергии: Учебное пособие / Г.В. Пачурин, Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, Е.В. Крюков / Под общ. ред. Г.В. Пачурина. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 236 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).

12. Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Кечкин А.Ю., Головкин Н.Н. Экологические проблемы возобновляемых источников энергии (монография) Нижегород. Гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 164 с.

13. Суржикова О.А. Формирование оптимальной структуры источников электрической энергии для территориально удаленных районов: диссертация... кандидата экономических наук: 08.00.05 [Место защиты: Сиб. аэрокосм. акад. им. акад. М.Ф. Решетнева]. – Томск, 2010. – 176 с.