

УДК 621.311

ОБОСНОВАНИЕ МОЩНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С МАЛОЙ ТЭЦ*

Ю.Е. Николаев, В.Ю. Игнатов, А.А. Федина

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
д. 77, ул. Политехническая, Саратов, 410054, Россия
тел.: +7 (917) 327-84-33; e-mail: v_ignatov@bk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.31-39

Заключение совета рецензентов: 27.09.19 Заключение совета экспертов: 01.11.19 Принято к публикации: 06.12.19

Рассматривался вопрос выбора электрической мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) при совместной работе с газотурбинной установкой (ГТУ). Анализировалась проблема повышения эффективности энергоснабжения небольших городов путем создания комбинированных источников на базе малых теплоэлектростанций (ТЭЦ) и ВЭУ.

Предложена схема комбинированного источника, которая включает в себя установку, работающую на органическом топливе, и установку, работающую за счет возобновляемого источника энергии – ветра. Для определения эффективности источника была разработана математическая модель, с помощью которой рассчитывались количественные и экономические показатели. В качестве исходных данных выступали: суточный график электрических нагрузок; график тепловых нагрузок отопления, вентиляции и ГВС; среднемесячные температура и скорость ветра; зависимость изменения электрической мощности ВЭУ от скорости ветра. На основе данной математической модели был произведен расчет комбинированного источника (ГТУ мощностью 2,5 МВт и ВЭУ мощностью 100 кВт). Годовая выработка электроэнергии на ГТУ составила 26 717,703 МВт·ч/год, на ВЭУ – 92,917 МВт·ч/год. Кроме того, определены экономические показатели: чистый дисконтированный доход (ЧДД), индекс доходности, внутренняя норма доходности и срок окупаемости.

Произведен сравнительный анализ срока окупаемости предложенной схемы в зависимости от изменения установленной мощности ВЭУ от 100 кВт до 1 500 кВт. В ходе анализа полученных значений ЧДД и срока окупаемости был сделан вывод о том, что по мере увеличения мощности ВЭУ экономическая эффективность энергокомплекса снижается. Это связано с увеличением капиталовложений в ВЭУ, изменением стартовой скорости ВЭУ, а также снижением выработки электрической энергии за счет ВЭУ. Доказана целесообразность использования в комбинированной схеме ВЭУ мощностью 100–300 кВт, при этом срок окупаемости составит около 10 лет.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка (ВЭУ); малая ТЭЦ; газотурбинная установка (ГТУ); интегрирование ВЭУ и ГТУ; экономия топлива; энергия ветра; математическая модель.

SUBSTANTIATION OF THE CAPACITY OF THE WIND-DRIVEN POWER PLANT WITH A SMALL COMBINED HEAT AND POWER PLANT

Yu.E. Nikolaev, V.Yu. Ignatov, A.A. Fedina

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77 Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054, Russia
tel.: +7 (917) 327 84 33; e-mail: v_ignatov@bk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.31-39

Referred 27 September 2019 Received in revised form 1 November 2019 Accepted 6 December 2019

*Николаев Ю.Е., Игнатов В.Ю., Федина А.А. Обоснование мощности ветроэнергетической установки при совместной работе с малой ТЭЦ // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;01-06:31-39.



The paper deals with the issue of choosing the electric power of a wind-driven power plant (WDPP) when working together with a gas turbine unit (GTU). The paper touches upon the problem of improving the efficiency of energy supply to towns by creating combined sources based on small CHPP and wind turbines.

The authors have proposed a scheme of the combined source, which includes the installation operating on organic fuel and the installation operating at the expense on a renewable energy source – wind. In order to determine the effectiveness of the source, we have developed a mathematical model which helps to calculate the quantitative and economic indicators. The initial data used are: the daily graph of electrical loads; the graph of thermal loads of heating, ventilation and hot water; the average monthly temperature and wind speed; the dependence of changes in the electrical power of wind turbines on wind speed. According to this mathematical model, the combined source is calculated (GTU with a capacity of 2.5 MW and wind turbines with a capacity of 100 kW). Annual electric-power generation at gas turbines is 26717,703 MW·h / year, wind turbines – 92,917 MW·h / year. Economic indicators are also defined – net present value (NPV), discounted profitability index, internal rate of return and payback time.

The paper makes a comparative analysis of the payback period of the proposed scheme depending on the change in the installed capacity of wind turbines from 100 to 1500 kW. Analyzing the obtained values of NVP and the payback time, it can be concluded that as the power of wind turbines increases, the economic efficiency of the energy complex decreases. This is due to increased investment in wind turbines, a change in the starting speed of a wind power plant, as well as a decrease in electrical energy production due to wind turbines. The conclusion is made about the expediency of using in the combined scheme of a wind-driven power-plant with a capacity of 100–300 kW, with a payback time of about 10 years.

Keywords: wind-driven power plant (WDPP); small combined heat and power plant; gas turbine unit (GTU); integration of WDPP and GTU; fuel economy; wind energy; mathematical model.



Юрий Евгеньевич Николаев
Yuri Nikolaev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры ТАЭ им. А.И. Андрущенко СГТУ им. Ю.А. Гагарина.

Образование: СГТУ им. Ю.А. Гагарина (1973 г.).

Область научных интересов: системы энергоснабжения на базе комбинированных теплоэнергетических установок на органическом топливе и возобновляемых энергоресурсах.

Публикации: 10.

Scopus код: 5062-0254

Scopus Author ID: 5707815

H-index 4.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at the Chair of Thermal and Atomic Energy in Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 1973.

Research interests: energy supply systems based on combined heat and power plants using organic fuel and renewable energy resources.

Publications: 10.



Владимир Юрьевич Игнатов
Vladimir Ignatov

Сведения об авторе: аспирант кафедры ТАЭ им. А.И. Андрущенко СГТУ им. Ю.А. Гагарина.

Образование: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, магистр (2017 г.).

Область научных интересов: ветроэнергетика; комбинирование установок на основе традиционных видов топлива и ветрогенераторов.

Публикации: 4.

Scopus код: 8793-3400

Scopus Author ID: 57500720736

Information about the author: Postgraduate, the Chair of Thermal and Atomic Energy in Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, MSc, 2017.

Research interests: wind power; combining installations based on traditional fuels and wind turbines.

Publications: 4.



Анастасия Александровна Федина
Anastasiia Fedina

Сведения об авторе: магистрант 2 курса кафедры ТАЭ им. А.И. Андрущенко СГТУ им. Ю.А. Гагарина.

Образование: СГТУ имени Гагарина Ю.А., бакалавр (2017 г.).

Область научных интересов: комбинированные установки на базе ГТУ и ВЭУ.

Information about the author: MSc, the Chair of Thermal and Atomic Energy in Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2017.

Research interests: combined installation on the basis of gas turbines and wind turbines.



1. Введение

Актуальным направлением современного этапа развития теплоэнергетики РФ является повышение эффективности производства электрической и тепловой энергии. Это достигается путем сооружения мощных парогазовых ТЭЦ с электрическим КПД 55÷60 % для энергоснабжения крупных городов и промышленных комплексов. Для энергоснабжения небольших городов и предприятий наиболее широко применяется раздельная схема энергоснабжения с подачей электроэнергии по электросетям от различных электростанций и выработкой теплоты на местных котельных. В связи с высоким физическим износом оборудования источников и сетей коэффициент эффективности использования энергии топлива оказывается на уровне 50÷60 % [1]. С целью повышения эффективности энергоснабжения небольших и удаленных от крупных источников энергии потребителей возможно сооружение малых ТЭЦ, работающих совместно с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) [2, 3]. В этом случае установки, работающие на органическом топливе, являются замыкающим звеном для выработки требуемого количества электроэнергии потребителем. Схема такого комбинированного источника приведена на рис. 1.

На ВЭУ вырабатывается электрическая энергия переменной мощности и частоты тока, которая после преобразователя работает параллельно с газотурбинной установкой (ГТУ) малой ТЭЦ (МТ). Отпуск теплоты осуществляется от котла-утилизатора ГТУ и пикового котла.

В рассматриваемой схеме электрическая мощность ГТУ принимается равной максимальной нагрузке потребителя, мощность ВЭУ является переменной величиной, и с ее увеличением снижается расход топлива в камере сгорания ГТУ, следовательно, изменяется количество утилизируемой теплоты в котле-утилизаторе и тепловая нагрузка пикового котла. В связи с этим мощность ВЭУ должна быть экономически обоснована.

Комбинированию ВЭУ и установок, работающих на органическом топливе, посвящено большое количество публикаций [4–17], в которых рассматриваются вопросы определения эффективности применения ВЭУ для энергоснабжения потребителей, вопросы надежности и сокращения выбросов CO₂ от тепловых электростанций путем замещения части топлива [7–10]. Российские авторы, в отличие от зарубежных, уделяют много внимания гибридным источникам на базе ВЭУ и дизельных электростанций [11–14]. В зарубежной статье [15] авторы проводят технико-экономический анализ пяти концепций ветряных тепловых энергетических систем, в которых совместно с ВЭУ применяются электрические котлы, тепловые насосы. Статьи [7, 10] посвящены комби-

нированию парогазовой установки и ВЭУ. В [7] избыточная энергия от возобновляемого источника используется для предварительного нагрева природного газа, предназначенного для парогазовой установки. В предложенном патенте [10] энергия ВЭУ задействована в теплонагревательном элементе для перегрева пара паротурбинной установки.

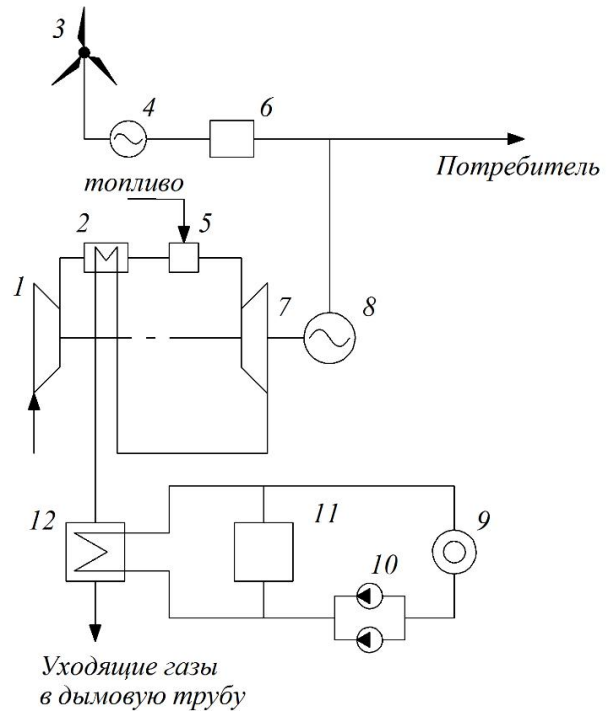


Рис. 1 – Схема комбинированной установки на базе ГТУ и ВЭУ: 1 – компрессор газотурбинной установки; 2 – регенератор; 3 – ВЭУ; 4 – генератор ВЭУ; 5 – камера сгорания ГТУ; 6 – преобразователь тока; 7 – ГТУ; 8 – генератор ГТУ; 9 – тепловой потребитель; 10 – сетевые насосы; 11 – пиковый котел; 12 – котел-утилизатор
Fig. 1 – The scheme of the combined plant on the basis of gas turbines unit (GTU) and wind driven power plant (WDPP): 1 – gas turbine compressor; 2 – air boiler; 3 – wind driven power plant; 4 – wind driven generator; 5 – combustion can GTU; 6 – current source converter; 7 – gas turbine plant; 8 – electric power generator; 9 – to the consumer; 10 – network pump; 11 – peak boiler; 12 – exhaust-heat boiler

Однако вопросы технико-экономического анализа комбинированной установки на базе малой ТЭЦ и ВЭУ не нашли достаточного отражения в публикациях.

Данное исследование посвящено технико-экономическому обоснованию рационального выбора электрической мощности ВЭУ комбинированного энергокомплекса на основе малой ТЭЦ и ВЭУ. Впервые поставлена задача и выполнен численный эксперимент по обоснованию рациональной установленной мощности ВЭУ в составе энергокомплекса.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
N	Мощность ГТУ, кВт
$\bar{N}_э$	Относительная электрическая нагрузка
Q	Теплота, отводимая от котла-утилизатора, кВт
T	Период времени
T_1	Температура наружного воздуха, К
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\eta_э$	Электрический КПД ГТУ
<i>Буквы русского алфавита</i>	
Э	Выработка электроэнергии
<i>Индексы нижние</i>	
ку	Котел-утилизатор
ок	Окупаемость
э	Электрический
<i>Индексы верхние</i>	
Г	В годовом исчислении
р	Расчетный
<i>Аббревиатуры</i>	
ВНД	Внутренняя норма доходности
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
ГТУ	Газотурбинная установка
ИД	Индекс доходности
КПД	Коэффициент полезного действия
МТ	Малая ТЭЦ
ПК	Пиковый котел
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ЧДД	Чистый дисконтированный доход

2. Теоретический анализ

2.1. Разработка математической модели

Для определения эффективности комбинированного источника на базе малой ТЭЦ с газотурбинными установками и ВЭУ была разработана математическая модель, описывающая количественные взаимосвязи энергетических потоков. В качестве исходных данных приняты суточный график электрических нагрузок (рис. 2), график тепловых нагрузок отопления, вентиляции и горячего водоснабжения в месте расположения источника энергоснабжения, среднемесячные температуры наружного воздуха.

Зависимость изменения электрической мощности ВЭУ от скорости ветра и почасовое изменение скорости ветра показаны на рис. 3 и 4 [3, 18, 19].

С помощью этих данных были определены среднемесячные и годовая выработка энергии ВЭУ, электрическая мощность и годовая выработка энергии ГТУ. Расчет термодинамического цикла ГТУ выполнен на основе методических положений [20] при изменении температуры наружного воздуха [19] и от-

носительной электрической нагрузки суточного графика потребителя.

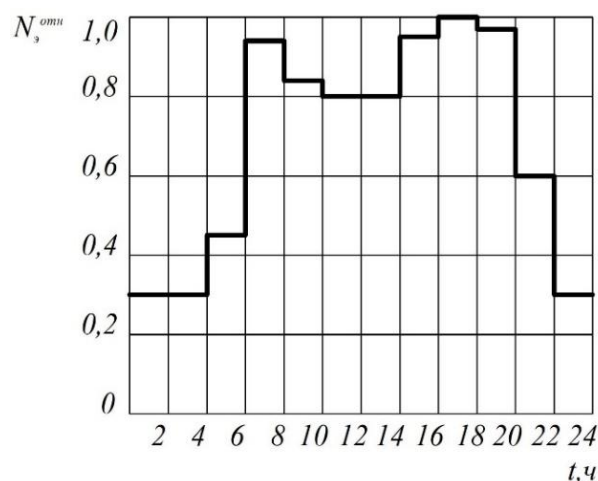


Рис. 2 – Суточный график электрической нагрузки
Fig. 2 – Daily schedule of electric demand

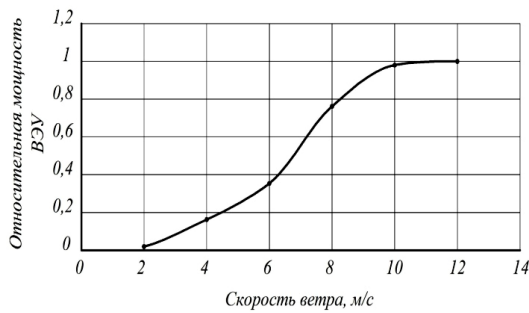


Рис. 3 – Зависимость электрической мощности ВЭУ от скорости ветра

Fig. 3 – Dependence of electric power of wind turbine on wind speed

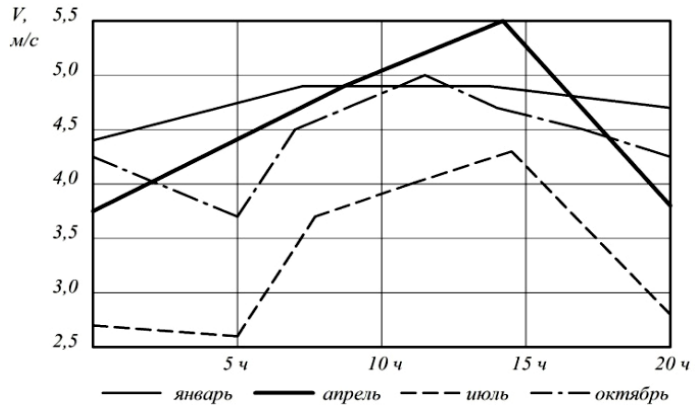


Рис. 4 – Почасовое изменение скорости ветра за каждый месяц года в месте расположения источника

Fig. 4 – Hourly change in wind speed for each month of the year at the source location

Среднемесячная и годовая выработка электроэнергии на ВЭУ рассчитаны по выражениям, кВт·ч/год:

$$\mathcal{E}_j^{ВЭУ} = \sum_{i=1}^{12} N_i^{ВЭУ} \cdot \tau_i \cdot n_j, \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{ВЭУ}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^{12} \mathcal{E}_j^{ВЭУ}, \quad (2)$$

где $N_i^{ВЭУ}$ – электрическая мощность ВЭУ в i -часе по суточному графику изменения скорости ветра, кВт; τ_i – продолжительность стояния скорости ветра, ч/сут.; n_j – число суток в j -месяце.

Среднемесячная и годовая выработка электроэнергии ГТУ рассчитаны по выражениям, кВт·ч/мес., кВт·ч/год,

$$\mathcal{E}_j^{\Gamma_{ГТУ}} = \sum_{i=1}^{24} (N_{n,i} - N_i^{ВЭУ}) \cdot \tau_i \cdot n_j, \quad (3)$$

$$\mathcal{E}_{ГТУ}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^{12} \mathcal{E}_j^{\Gamma_{ГТУ}}, \quad (4)$$

где $N_{n,j}$ – электрическая нагрузка потребителя на i -режиме суточного графика, кВт.

Среднемесячная тепловая нагрузка пикового котла (ПК), кВт,

$$Q_j^{ПК} = Q_{n,j} - Q_j^{\Gamma_{ГТУ}}, \quad (5)$$

где $Q_{n,j}$ – средняя тепловая нагрузка потребителя в j -месяце, кВт; $Q_j^{\Gamma_{ГТУ}}$ – средняя тепловая мощность, вырабатываемая котлом-утилизатором ГТУ и опре-

деляемая на основе расчета газотурбинной установки, кВт.

Годовая выработка теплоты на ПК, кВт·ч/год,

$$Q_{ПК}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^{12} Q_j^{ПК}. \quad (6)$$

Расходы топлива ГТУ и ПК рассчитываются по следующим выражениям, кг у.т./год:

$$V_{ГТУ}^{\Gamma} = \mathcal{E}_{ГТУ}^{\Gamma} / (Q_n^p \cdot \eta_{ГТУ}^{\Gamma}), \quad (7)$$

$$V_{ПК}^{\Gamma} = Q_{ПК}^{\Gamma} / (Q_n^p \cdot \eta_{ПК}^{\Gamma}), \quad (8)$$

где Q_n^p – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг у.т.; $\eta_{ГТУ}^{\Gamma}$, $\eta_{ПК}^{\Gamma}$ – среднегодовые КПД ГТУ и ПК.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Численный эксперимент и анализ результатов

В качестве базовой газотурбинной установки была рассмотрена ГТУ-2,5 с регенеративным подогревом воздуха. Результаты расчетов изменения электрического КПД, теплоты, отводимой от котла-утилизатора, электрической мощности ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха и относительной электрической нагрузки аппроксимированы регрессионными выражениями:

– при включенном регенераторе:

$$\eta_3 = 0,439 - 0,000767 \cdot T_1 + 0,073 \cdot \bar{N}_3, \quad (9)$$

$$Q_{ку} = -5240,099 + 19,559 \cdot T_1 + 1300,65 \cdot \bar{N}_3, \quad (10)$$

$$N_3 = 223,733 - 0,835 \cdot T_1 + 2523,095 \cdot \bar{N}_3; \quad (11)$$

– при выключенном регенераторе:



$$\eta_3 = -0,15 + 0,00135 \cdot T_1 + 0,0331 \cdot \bar{N}_3, \quad (12)$$

$$Q_{\text{кв}} = 19596,763 - 72,437 \cdot T_1 + 4454,117 \cdot \bar{N}_3, \quad (13)$$

$$N_3 = 583,023 - 2,267 \cdot T_1 + 2589,995 \cdot \bar{N}_3, \quad (14)$$

где η_3 – электрический КПД ГТУ; T_1 – температура наружного воздуха, К; \bar{N}_3 – относительная электрическая нагрузка; $Q_{\text{кв}}$ – теплота, отводимая от котла-

утилизатора, кВт; N_3 – электрическая мощность ГТУ, кВт.

Результаты расчета показателей ГТУ продемонстрировали хорошую точность по сравнению с детальным расчетом установки, погрешность результатов составила не более 6 %. С помощью полученных уравнений были проведены расчеты месячных и годовых количественных показателей ГТУ. При этом принята работа ГТУ в отопительный период без регенератора, в летний период – с включенным регенератором. На рис. 5 приведена блок-схема расчета количественных и экономических показателей комбинированной схемы.

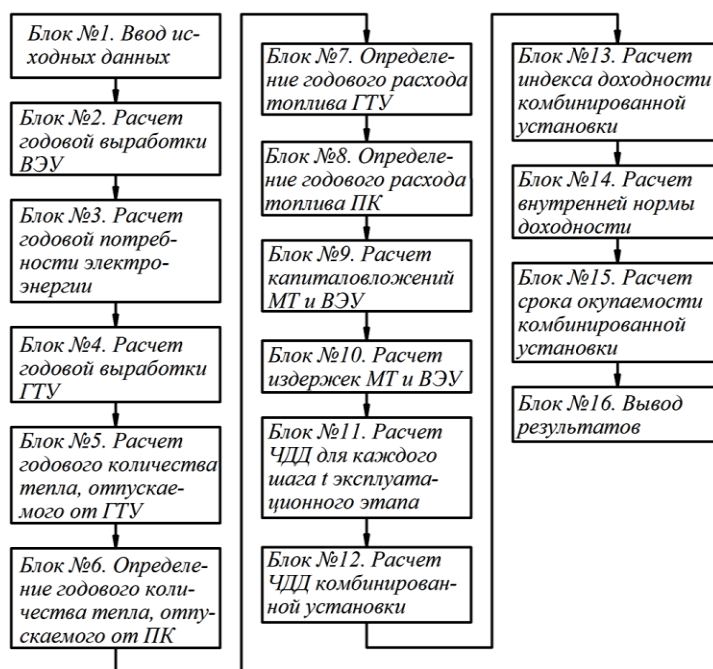


Рис. 5 – Блок-схема расчета количественных энергетических и экономических показателей малой ТЭЦ и ВЭУ: МТ – малая ТЭЦ; ЧДД – чистый дисконтированный доход
Fig. 5 – Block scheme of the calculation of the quantitative energy and economic indicators of small CHPP and WDP: SSCU – small-scale cogeneration unit; NVP – net present value

Результаты расчетов МТ с двумя газотурбинными установками ГТУ-2,5 МВт и ВЭУ 100 кВт для условий Среднего Поволжья приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Годовые показатели комбинированной установки при $N_{\text{ВЭУ}} = 100$ кВт

Table 1
 Annual indicators of the combined installation with $N_{\text{WDP}} = 100$ kW

Наименование показателя	Результат
Годовая выработка электроэнергии ВЭУ, МВт·ч/год	92,917
Годовая выработка электроэнергии ГТУ, МВт·ч/год	26 717,703
Годовое количество тепла, отпускаемого от котла-утилизатора ГТУ, МВт·ч/год	41 095,35
Годовое количество тепла, отпускаемого от пикового котла, МВт·ч/год	7 354,65
Годовой расход топлива ГТУ, тыс. кг у.т./год:	3 603,29
Годовой расход топлива пиковым котлом, тыс. кг у.т./год	278,43

С помощью математической модели выполнены расчеты экономических показателей малой ТЭЦ + ВЭУ с определением ЧДД, индекса доходности (ИД), внутренней нормы доходности (ВНД) и срока окупаемости ($T_{ок}$) в зависимости от электрической мощности ВЭУ. При этом приняты следующие исходные

данные: стоимость электрической энергии на шинах источника 2 руб./кВт·ч, стоимость отпущенной теплоты 280 руб./ГДж, стоимость топлива 5 руб./кг у.т., удельная стоимость ВЭУ 62 160 руб./кВт, удельная стоимость малой ТЭЦ с ГТУ 70 000 руб./кВт. Результаты расчета показаны в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2
Экономические показатели малой ТЭЦ+ВЭУ в зависимости от установленной мощности ВЭУ
Table 2
Economic indicators of small CHPP+WDPF depending on the capacity of WDPF

Электрическая мощность ВЭУ, кВт	Наименование показателя			
	ЧДД	ИД	ВНД	$T_{ок}$, лет
100	239,1	1,982	0,125	9,9
150	234,5	1,997	0,1209	10
300	220,8	1,73	0,11	10,1
500	200,1	1,848	0,1103	10,9
1 000	148,2	1,650	0,1025	11,9
1 500	85,7	1,454	0,0982	13,2

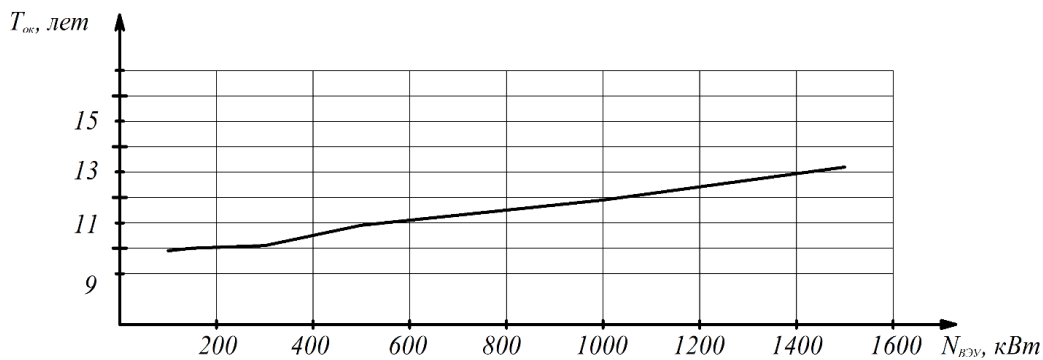


Рис. 6 – Зависимость срока окупаемости комбинированной установки от мощности ВЭУ
Fig. 6 – The dependence of the payback period of the combined plant on the capacity of WDPF

При анализе результатов расчета экономических показателей следует отметить, что по мере роста мощности ВЭУ эффективность комбинированной установки снижается. Однако в диапазоне $N_{ВЭУ} = 100-300$ кВт темп роста срока окупаемости увеличивается всего на 3 %, а темп снижения ЧДД составляет около 9 %. При дальнейшем увеличении мощности ВЭУ указанные темпы существенно возрастают в результате изменения стартовой скорости ВЭУ, повышения ее стоимости, снижения выработки электрической энергии. Таким образом, обоснована экономическая целесообразность применения ВЭУ в составе комбинированной схемы до мощности 300 кВт, что в относительных единицах составляет 2÷6 % от максимальной электрической нагрузки потребителя.

4. Заключение

Обоснована схема автономного энергокомплекса в составе малой ТЭЦ с ГТУ и ВЭУ, обеспечивающей

выработку электрической и тепловой энергии для энергоснабжения потребителей.

Разработанная математическая модель расчета энергетических и экономических показателей комбинированной установки малая ТЭЦ+ВЭУ учитывает изменение скорости ветра, температуры наружного воздуха, электрической и тепловой нагрузки в течение годового периода.

Рациональная электрическая мощность ветроэнергетической установки в составе малой ТЭЦ+ВЭУ находится в интервале 2÷6 % от максимальной нагрузки потребителя.

Список литературы

- [1] Филиппов, С.П. ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления [Текст] / С. П. Филиппов, М. Д. Дильман // Теплоэнергетика. – 2018. – № 11. – С. 5–22.
- [2] Стенников, В.А. Интегрированные схемы энергоснабжения на базе ТЭЦ и ВЭС [Текст] / В.А.

Стенников, С.В. Жарков, И.В. Постников, А.В. Пеньковский // *Промышленная энергетика*. – 2016. – № 11. – С. 57–62.

[3] Николаев, Ю.Е. Оценка экономических показателей интегрированной схемы энергоснабжения на основе малой ТЭЦ и ВИЭ [Текст] / Ю. Е. Николаев, В.Ю. Игнатов // *Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 9. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIV Международной научно-технической конференции. Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г.* – 2018. – С. 129–133.

[4] Габдрахманова, Т.С. Анализ схем автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии [Текст] / Т.С. Габдрахманова, Л.Б. Директор // *Промышленная энергетика*. – 2015. – № 4. – С. 48–51.

[5] Дорошин, А.Н. Многофакторный анализ эффективности энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для энергообеспечения автономного потребителя / А.Н. Дорошин, В.И. Виссарионов, Н.К. Малинин // *Вестник МЭИ*. – 2011. – № 2. – С. 45–53.

[6] Марченко, О.В. Анализ совместного использования энергии солнца и ветра в системах автономного энергоснабжения / О.В. Марченко, С.В. Соломин // *Промышленная энергетика*. – 2016. – № 9. – С. 39–43.

[7] Gangoli Rao, A., F.S.C.van den Oudenalder, Klein, S.A. Natural gas displacement by wind curtailment utilization in combined-cycle power plants [Text] / A. Gangoli Rao [et al.] // *Energy*. – 2019. – Vol. 168. – P. 477–491.

[8] Lund H, large-scale integration of wind power into different energy systems [Text] / H. Lund // *Energy*. – 2005. – Vol. 30. – P. 2402–2412.

[9] Pensini, A. Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels / A. Pensini [et al.] // *Energy*. – 2014. – Vol. 131. – P. 530–543.

[10] Пат. № 2557049 РФ, МПК⁵¹ F01K3/22. Способ работы паротурбинной установки / Жарков С.В., Кейко А.В., Постников И.В., Пеньковский А.В.; заявители и патентообладатели Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Систем Энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской Академии Наук. – № 2012115355/06; заявл. 17.04.2017; опубл. 20.07.2015.

[11] Соснина, Е.Н. Техничко-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электроснабжения энергоудаленных поселений / Е.Н. Соснина [и др.] // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2016. – Т. 112. – № 1. – С. 65–72.

[12] Денисов, Р.С. К вопросу обоснования состава и параметров оборудования ветро-дизельной электростанции / Р.С. Денисов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2014. – Т. 151. – № 11. – С. 72–77.

[13] Елистратов, В.В. Ветродизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных

территорий России / В.В. Елистратов, М. А. Конищев // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2014. – Т. 151. – № 11. – С. 62–71.

[14] Сибгатулин, А.Р. Оптимизация состава оборудования на основе возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения автономных потребителей небольшой мощности / А.Р. Сибгатулин, В.В. Елистратов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2016. – № 23–24. – С. 51–67.

[15] Cao K.K. Expanding the horizons of power-to-heat: cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems / K.K. Cao [et al.] // *Energy*. – 2018. – Vol. 164. – P. 925–936.

[16] Дерюгина, Г.В. Исследование факторов и математических моделей, влияющих на проектные показатели энергоэффективности ветродизельных комплексов / Г.В. Дерюгина [и др.] // *Вестник КРСУ*. – 2017. – № 8. – С. 44–48.

[17] Грибков, С.В. Ветро-солнечно-дизельные комплексы электроснабжения малых мощностей как основа развития ВИЭ в России / С.В. Грибков // *Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность*. – 2016. – С. 124–128.

[18] Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. *Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание / Справочно-методическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких*. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетика», 2014. – 304 с.

[19] Официальный сайт NASA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/>. – (Дата обращения: 21.02.2019).

[20] Стационарные газотурбинные установки: справочник / Л.В. Арсеньев [и др.]. – Ленинград: «Машиностроение», Ленинградское отделение, 1989. – 120 с.

References

[1] Filippov S.P., Dil'man M.D. CHP Plants in Russia: the Necessity for Technological Renovation (TETS v Rossii: neobkhodimost' tekhnologicheskogo obnovleniya). *Thermal Engineering*, 2018;65(11):775–790; doi: 10.1134/S0040601518110022 (in Russ).

[2] Stennikov V.A., Zharkov S.V., Postnikov I.V., et al. Integrated power supply schemes based on CHPP and WDPP (Integrirrovannye skhemy energosnabzheniya na baze TETs i VES). *Promyshlennaya energetika*, 2016; 11:57–62 (in Russ).

[3] Nikolaev Yu.E., Ignatov V.Yu. Assessment of economic indicators of an integrated energy supply scheme based on a small CHP and renewable energy sources (Osenka ekonomicheskikh pokazatelei integrirrovannoi skhemy energosnabzheniya na osnove maloi TETs i VIE). *XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovershenstvovanie energeticheskikh sistem i teploenergeticheskikh kompleksov"*, 30 Oct – 1 Nov 2018; Saratov, Russia; pp.129–133 (in Russ).



- [4] Gabderakhmanova T.S., Direktor L.B. Analysis of stand-alone power supply schemes based on renewable energy sources (Analiz skhem avtonomnogo elektrosnabzheniya na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov energiiirakhmanova). *Promyshlennaya energetika*, 2015;4:48–51 (in Russ).
- [5] Doroshin A.N., Vissarionov V.I., Malinin N.K. Multifactorial analysis of the efficiency of energy complexes based on renewable energy sources for energy supply of an stand-alone power supply consumer (Mnogofaktornyi analiz effektivnosti energokompleksov na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov energii dlya energoobespecheniya avtonomnogo potrebitelya). *Vestnik MEI*, 2011;2:45–53 (in Russ).
- [6] Marchenko O.V., Solomin S.V. Analysis of the sharing of solar and wind energy in stand-alone power supply (Analiz sovместnogo ispol'zovaniya energii solntsa i vetra v sistemakh avtonomnogo energosnabzheniya). *Promyshlennaya energetika*, 2016;9:39–43 (in Russ).
- [7] Gangoli Rao A., van den Oudenalder F.S.C., Klein S.A. Natural gas displacement by wind curtailment utilization in combined-cycle power plants. *Energy*, 2019;168:477–491.
- [8] Lund H. large-scale integration of wind power into different energy systems. *Energy*, 2005;30:2402–2412.
- [9] Pensini A., Rasmussen C.N., Kempton W. Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels. *Energy*, 2014;131:530–543.
- [10] Zharkov S.V., Keiko A.V., Postnikov I.V., Pen'kovskii A.V. Method of operation of the steam turbine plant (Sposob raboty paroturbinnoi ustanovki). Patent RF No. 2557049. 07.20.2015. Available on: https://yandex.ru/patents/doc/RU2557049C2_20150720 (02.04.2020 (in Russ)).
- [11] Sosnina E.N., Shakukho A.V., Lipuzhin I.A., et al. Technical and economic analysis of the use of wind-diesel power plants for power supply of energy remote settlements (Tekhniko-ekonomicheskii analiz primeneniya vetro-dizel'nykh elektrostantsii dlya elektrosnabzheniya energoudalennykh poselenii). *Trudy NGTU named after. R.E. Alekseeva*, 2016;112(1):65–72 (in Russ).
- [12] Denisov R.S. On the issue of substantiating the composition and parameters of wind-diesel power plant equipment (K voprosu obosnovaniya sostava i parametrov oborudovaniya vetro-dizel'noi elektrostantsii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;151(11):72–77 (in Russ).
- [13] Elistratov V.V., Konishchev M.A. Wind-diesel power stations for stand-alone power supply of the Northern territories of Russia (Vetrodizel'nye elektrostantsii dlya avtonomnogo energosnabzheniya severnykh territorii Rossii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;151(11):62–71 (in Russ).
- [14] Sibgatulin A.R., Elistratov V.V. Optimization of equipment composition based on renewable energy sources in power supply systems for stand-alone consumers of small capacity (Optimizatsiya sostava oborudovaniya na osnove vozobnovlyaemykh istochnikov energii v sistemakh elektrosnabzheniya avtonomnykh potrebitel'ei nebol'shoi moshchnosti). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;23–24:51–67; doi: 10.15518/isjaee.2016.23-24.051-067 (in Russ).
- [15] Cao K.K., Nitto A.N., Sperber E., et al. Expanding the horizons of power-to-heat: cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems. *Energy*, 2018;164:925–936.
- [16] Deryugina G.V., Karpov N.D., Shestopalova T.A., et al. Study of factors and mathematical models that affect the design performance of energy efficiency of wind-diesel complexes (Issledovanie faktorov i matematicheskikh modelei, vliyayushchikh na proektnye pokazateli energoeffektivnosti vetrodizel'nykh kompleksov). *Vestnik KRSU*, 2017;8:44–48 (in Russ).
- [17] Gribkov S.V. Wind-solar-diesel power supply systems of small capacity as a basis for RES development in Russia (Vetro-solnechno-dizel'nye komplekсы elektrosnabzheniya malykh moshchnostei kak osnova razvitiya VIE v Rossii). *Materialy mezhdunarodnogo kongressa REENCON-XXI: "Vozobnovlyaemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost"*, 13–14 October, 2016; pp. 124–128 (in Russ).
- [18] Bezrukih P.P., Bezrukih P.P. (ml.), Gribkov S.V. Wind power engineering: reference and methodological publication (Vetroenergetika: Spravochno-metodicheskoye izdaniye). Moscow: "IntekhenergoIzdat" Publ, 2014 (in Russ).
- [19] The official website of NASA [E-resource]. Available on: <https://power.larc.nasa.gov/> (02.21.2019).
- [20] Stationary gas turbine plants:book of reference (Stacionarnye gazoturbinnye ustanovki: spravochnik) / L.V. Arsen'ev et al. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., Leningradskoe otdelenie, 1989; pp. 120.

Транслитерация по BSI