

А. Л. ШУБЕНКО, Н. Ю. БАБАК, А. В. СЕНЕЦКИЙ, В. П. САРАПИН

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАСКАДНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ТУРБОУСТАНОВКИ НА НИЗКОКИПАЮЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ

АННОТАЦИЯ Представлены результаты технико-экономического анализа по оценке величины инвестиций и сроков окупаемости внедрения двухкаскадной когенерационной установки малой мощности на низкокипящем рабочем теле, с целью реализации стратегии «биоэнергетического поселка». Выполнено исследование по сопоставлению изменения сроков окупаемости рассматриваемой мини-ТЭЦ в зависимости от цен на энергоносители. Целесообразно реализовывать мини-ТЭЦ на биомассе начиная с мощности 450–550 кВт·э, простой срок окупаемости такой станции при действительных ценах на энергоносители составит 2,7–4 года.

Ключевые слова: энергосбережение, «биоэнергетический поселок», низкокипящее рабочее тело, тепловая схема, электрическая мощность, теплофикационный и конденсационный режимы, технико-экономические показатели, окупаемость энергоустановки.

O. SHUBENKO, M. BABAK, O. SENETSKYI, V. SARAPIN

ESTIMATING THE ENGINEERING AND TECHNICAL PERFORMANCES FOR THE STAGE THERMAL CIRCUIT OF TURBINE UNIT OPERATING ON LOW-BOILING WORKING MEDIA

ABSTRACT The data of engineering and economical analysis on the estimation of the value of required investments and the payback period in the case of implementation of the two-cascade cogeneration plant of a low power to realize "the biopower village" strategy have been given. The basic engineering and economical performances of mini-heat power plant were defined for climatic conditions in the city of Zaporozie. It has been established that the realization of this mini-HPP with the installed electric power of 110 KW can be promising (the 3.2 – year payback period) only at the standard fuel price of at least 40 USD and the energy price of 2.2. UAH (KW·h) and the heat price of 2200 UAH/Gcal. At the installed electric power of mini-HPP of 450 KW (350 KW·e for the first ORC (organic Rankin Cycle) loop) and 100 kW·e for the second loop and the same prices for the electric power and the heat the realization of it can be promising at 70 USD/t.s.f. (tons of standard fuel). The research was done to compare a change in payback periods for the given mini HPP depending on the prices for energy carriers. The obtained data showed that for the project of mini-HPP operating on the biomass with the power of 110 kW·e at available prices for power carriers the payback period will exceed 5 years. To shorten the payback period it is expedient to realize mini-HPP starting from the electric power of 450–550 kW·e. The ordinary payback period for such a power plant will range from 2.7 to 4 years depending on the specific cost of the equipment. If the biomass power energy is sold at a current "green rate" (0.1239 EUR/(kW·h) available in Ukraine the payback period for the given mini-HPP will be reduced 1.5 times. The preferences established by the State (+5 %) using the equipment manufactured in Ukraine will make the proposed mini HPP even more competitive.

Key words: power saving, "biopower village", low-boiling working medium, thermal diagram, electric power, cogeneration and condensation modes, engineering and economical performances, and the power plant payback period.

Введение

В настоящее время в Украине на единицу валового национального продукта энергетические затраты в 2–3 раза превышают аналогичные показатели развитых стран. Потому как среди приоритетных направлений разработок в Украине [1], так и среди основных научных направлений и проблем фундаментальных исследований НАН Украины особое внимание направлено на решение физико-технических проблем энергетики [2]. С целью обеспечения энергетической независимости Украины приоритетным является вопрос замещения природного газа другими источниками энергии.

Учитывая перечисленное, а также тенденции развития энергетики в мире [3], все большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) и распределенным системам энергетики [4].

В средствах информации Украины в 2015 г. появились сведения о предполагаемых проектах

использования установок на биомассе для коммунальной энергетики 10 районных центров (г. Купянск, г. Балаклея, г. Волчанск и др.) Харьковской обл. [5]. По оценкам экспертов сроки строительства одного объекта – полтора года, окупаемость – 4 года.

Развивать распределенную энергетику в небольших населенных пунктах Украины можно используя местные возобновляемые биоресурсы, на основе имеющегося опыта европейских стран, в частности Германии, где более 15 лет устойчивый интерес проявляется к «биоэнергетическим поселкам» (реализовано более 100 проектов энергокомплексов) [6].

В основу этого проекта положена следующая концепция. «Биоэнергетический поселок» покрывает свои потребности в энергии (электричество и тепло), по крайней мере, на 50–60 % за счет произведенной в регионе биоэнергии. Жители принимают участие в процессах принятия решений и являются активными сторонниками концепции.

© А. Л. Шубенко, Н. Ю. Бабак, А. В. Сенецкий, В. П. Саралин, 2017

ции биоэнергетического села. Биоэнергетические установки находятся как минимум в доле собственности потребителей тепла или фермеров района. Биомасса, заготавливается на постоянной основе, непосредственно на окраинах. Таким образом, дополнительная стоимость создается в районе. Мероприятия по энергоэффективности и энергосбережению регулярно внедряются и анализируются.

Такая децентрализованная система распределенного энергоснабжения имеет следующие преимущества [6]:

- заменяет существующие ограниченные ископаемые источники энергии;
- снижает вредное воздействие на окружающую среду (выбросы CO₂);
- создает собственную долгосрочную безопасность энергообеспечения;
- позволяет выйти из системы общепринятого энергообеспечения;
- служит развитию общества (корпоративные прибыли, дополнительные рабочие места, налоговые поступления);
- создает экономическую выгоду, поскольку норма прибыли остается на месте.

Выбор электрической мощности установки в ~100 кВт обусловлен желанием оценить показатели установки минимальной мощности, с одной стороны, что, позволяет решить поставленную задачу обеспечения энергией организаций, находящихся на попечении общества, с другой – ограничиться минимальными инвестициями для реализации установки [7].

Целесообразность реализации энергетических установок на низкокипящих рабочих телах (НРТ) можно обосновать только на основе проведения технико-экономического анализа, который позволит оценить величины необходимых инвестиций и сроки окупаемости проекта.

Цель работы

Руководствуясь полученными результатами в [7], выбранным НРТ и конфигурацией тепловой схемы мини-ТЭЦ, рассчитаем и выполним анализ ее технико-экономических характеристик. Проведем оценку инвестиционной привлекательности когенерационной установки на местном виде топлива с применением ОРЦ (органический Ренкина цикл) технологии.

Постановка задачи

В качестве основных показателей используются чистая дисконтированная прибыль, срок окупаемости, индекс доходности инвестиций и др. [8]. В условиях переходной экономики Украины, когда курс национальной валюты трудно предсказуем на длительный период времени, наиболее часто используется такой критерий эффективности инвестиций, как простой срок окупаемости.

Простой срок окупаемости проекта определяется из

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{I_{\Sigma}}{Z_{\text{год}\Sigma}},$$

где I_{Σ} – суммарные инвестиции на реализацию проекта; $Z_{\text{год}\Sigma}$ – годовой доход на ТЭЦ, определяется из

$$Z_{\text{год}\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=\text{Пр}_{\text{реж}}} \left((k_{\text{и}i} ([c_{\text{э}}] - c_{\text{э}i}) N_{\text{э}i} + ([c_{\text{Q}}] - c_{\text{Q}i}) Q_i \right) \tau_{\text{реж}i},$$

где $\text{Пр}_{\text{реж}}$, $\tau_{\text{реж}}$ – количество и продолжительность в часах основных режимов работы ТЭЦ в течение года; $k_{\text{и}i}$ – коэффициент использования (далее будем считать, $k_{\text{и}i} = 0,95$, $i = 1, 2, \dots, \text{Пр}_{\text{реж}}$); $c_{\text{э}i}$, $c_{\text{Q}i}$ – себестоимость электроэнергии и теплоты при работе станции на i -ом режиме; $[c_{\text{э}}]$, $[c_{\text{Q}}]$ – стоимость продажи электроэнергии и теплоты; Q_i – теплота отпускаемая потребителям от ТЭЦ на i -м режиме; $N_{\text{э}i}$ – электрическая мощность отпускаемая потребителям от ТЭЦ на i -м режиме.

Опыт реализации проектов установки малых турбин в Украине свидетельствует о том, что инвестора интересуют проекты с простым сроком окупаемости, не превышающем 3 года [9].

В качестве примера оценивать показатели энергоустановки будем для условий г. Запорожья.

Проводить исследования для оценки технико-экономических показателей рассматриваемой мини-ТЭЦ с комбинированной схемой (см. рис. 1) достаточно на следующих четырех режимах работы [7]:

– летний режим – режим горячего водоснабжения (ГВС) с отключением подачи воды в ночное время (с 0 до 5 ч), его продолжительность $\tau_{\text{реж}0} = 4560$ ч (г. Запорожье);

– 1 режим – начало и конец отопительного периода с температурой наружного воздуха в интервале +5...+8 °С (его продолжительность для Запорожского региона $\tau_{\text{реж}1} = 669$ ч);

– 2 режим – отопительный период с температурой наружного воздуха в интервале 0...+5 °С ($\tau_{\text{реж}2} = 1514$ ч);

– 3 режим – максимальный отпуск теплоты в отопительный период, то есть стояние минусовых температур наружного воздуха $\tau_{\text{реж}3} = 4200 \text{ ч} - 2183 \text{ ч} = 2017 \text{ ч}$, при продолжительности отопительного периода 4200 ч.

На стадии предварительных расчетов трудно определить ряд характеристик, таких как суммарные инвестиции, стоимость топлива и др. Поэтому далее в исследованиях технико-экономических показателей рассматриваемого проекта мини-ТЭЦ будем ставить задачу определения условий (сочетание цены на топливо, инвестиций и т.д.), которые обеспечивают простой срок окупаемости менее 3 лет.

Состав основных данных, необходимых для этого, включает:

- характеристики топлива (состав и стоимость);
- объем произведенной энергии (электрической и тепловой) на заданном режиме работы;
- количество часов работы на данном режиме;

– расходы на ТЭЦ.

Для оценки стоимости местного топлива (М.Т.) из биомассы воспользуемся данными публикации авторов [12]. Основные свойства и ценовая характеристика некоторых видов местного топлива представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные свойства и цена местных твердых топлив

Фактор	Отходы сельского переработки солома [13]	«Энергетические» культуры (мискантус [14]), и их гранулы	Древесина и отходы ее переработки (кора, чипсы, опилки) ¹⁾ [15]	Торф фрезерный полубрикетов (кусковой торф)	Торфяные брикеты [16]
Свойства:					
– влажность, %	15–20	15–20	8–30	40–60	до 23
– зольность, %	0,5–20	4,8	0,7–10 [17]	до 15–25	18–20
– сера, %	0,2–0,7	0,12	0,3–3,4	0,2–0,9	0,15
– плотность, кг/м ³	80–120	1200	150–400	200	1200
$c_{\text{т}}$, грн/т, в том числе НДС	500–1200	800	500–1600	400–900	600–1500
$Q_{\text{р}}^{\text{н}}$, МДж/кг	17	16,9–19	12,6–15,9	11,0–13,8	14,9
$c_{\text{м.т.}}^{\text{у.т.}}$, в том числе НДС, USD/т.у.т.	42–84	53–56	47–118	43–74	51–124

¹⁾ Для хвойной породы.

Возможности использования М.Т. в Украине достаточно подробно рассмотрены на сайте [18]. Например, в работе [19] показано, что исходя из особенностей добычи торфа (площади торфяных полей, применяемой технологии), годового прироста растительных ресурсов (отходы переработки древесины, быстрорастущей древесины) близкой к рациональной для переработки на энергокомплексах является рецептура, включающая 40 % торфа, 40 % древесных отходов и 20 % растительной биомассы.

Данные таблицы подтверждают также, что рассматриваемая мини-ТЭЦ будет иметь достаточно хорошие экологические показатели. М.Т. имеет невысокую теплотворную способность, следовательно, низкую температуру сгорания. Последнее является одним из условий обеспечения допустимых норм по выбросам NO_x. Содержание серы в М.Т., как правило, небольшое (3,4 % серы содержится в коре хвойных [15], которую можно сжигать с добавлением топлива с малым содержанием этого элемента).

Для анализа условий, обеспечивающих перспективность внедрения рассматриваемой энергоустановки на М.Т., следует рассчитать затраты на мини-ТЭЦ на топливо при цене условного топлива 40, 60 и 80 USD/т.у.т. без НДС.

Оценим затраты на мини-ТЭЦ на производство электроэнергии и тепла, основными составляющими которых являются стоимость топлива и зарплата персонала с начислениями. Все расчеты ведутся без учета НДС.

Задавая постоянными в течение года КПД котла на биомассе ($\eta_{\text{к}} = 0,85$) и количество теплоты, подведенное в котле ($Q_{\text{к}} = 500$ кВт), вычислим

часовой расход условного топлива на мини-ТЭЦ $b_{\text{у.т.}}$,

$$b_{\text{у.т.}} = \frac{Q_{\text{к}}}{\eta_{\text{к}}} \frac{3600}{4,1893 \cdot 7000} = \frac{500 \cdot 3,6}{0,85 \cdot 29,32} = 72,21 \frac{\text{кг.у.т.}}{\text{ч}},$$

где параметры сведены к одним размерностям.

Зная стоимость условного топлива $c_{\text{у.т.}}$, задавшись коэффициентом использования оборудования $k_{\text{и}} = 0,95$ и средней продолжительностью месяца $\tau_{\text{мес.}} = 730$ ч, несложно вычислить месячные расходы на мини-ТЭЦ на топливо $Z_{\text{т.мес.}}$, грн/мес.

$$Z_{\text{т.мес.}} = b_{\text{у.т.}} \frac{25c_{\text{у.т.}}}{1000} k_{\text{и}} \tau_{\text{мес.}} = 1252c_{\text{у.т.}}$$

Месячную зарплату персонала (12 человек) мини-ТЭЦ с начислениями ориентировочно оценим в 60 тыс. грн.

Таким образом, если принять, что доля затрат на топливо и персонал составляет 90 % всех месячных расходов на мини-ТЭЦ, можно вычислить остальные расходы.

Несложно оценить, что при стоимости условного топлива 40–50 USD/т.у.т. без НДС месячные расходы мини-ТЭЦ на топливо размерные с расходами на зарплату. Это свидетельствует о том, что увеличение мощности энергоустановки приведет к заметному улучшению экономических показателей мини-ТЭЦ, поскольку вклад заработной платы персонала в себестоимость электроэнергии и теплоты будет уменьшаться.

В табл. 2 в качестве примера представлены результаты расчета себестоимости электроэнергии и тепла (без учета «зеленого тарифа»), а также результаты годовой хозяйственной деятельности рассматриваемой мини-ТЭЦ при цене условного топлива 40 USD/т.у.т. без НДС с использованием

данных о предполагаемых режима работы станции.

Поскольку продолжительность рассмотренных режимов работы мини-ТЭЦ задана в часах, расчеты проведены на базе часовых показателей.

Как видно при анализе данных табл. 2, себестоимость электроэнергии на всех когенерационных режимах работы установки достаточно низкая и изменяется в диапазоне 0,425–1,06 грн/(кВт·ч). Себестоимость производства электроэнергии летом в ночное время, когда нет ГВС (конденсационный режим), достаточно большая 2,203 грн/(кВт·ч) (выше, чем в сети).

По данным табл. 2 в отопительный период себестоимость тепла, отпускаемого рассматриваемой мини-ТЭЦ, достаточно конкурентная. Себестоимость же воды ГВС 1234,0 грн/Гкал заметно выше. При расчете себестоимости теплоснабжения ГВС содержание тепловых сетей не учитывалось. Предполагалось, что длина сетей небольшая, то есть расходы на их обслуживание не превысят сумму в 20–30 тыс./мес. и существенно не отразятся на годовых показателях станции.

Согласно табл. 2 можно оценить результаты годовой хозяйственной деятельности рассматриваемой мини-ТЭЦ и простой срок окупаемости энергоустановки. Результаты такого расчета для удельной стоимости оборудования мини-ТЭЦ 2000 USD/кВт·э представлены в табл. 3.

Согласно табл. 2 можно оценить результаты годовой хозяйственной деятельности рассматриваемой мини-ТЭЦ и простой срок окупаемости энергоустановки. Результаты такого расчета для удельной стоимости оборудования мини-ТЭЦ 2000 USD/кВт·э представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Результаты расчета себестоимости электроэнергии и теплоты, отпускаемых от мини-ТЭЦ установленной электрической мощностью 110 кВт с двумя ОРЦ каскадами, работающих при постоянной нагрузке, при цене условного топлива (биомасса) 40 USD/т.у.т. без НДС

Величина	Режимы				
	Лето		Переходной	Начало зимы	Зима
	день	ночь	1	2	3
Продолжительность режима, ч	3615	951	669	1514	2007
Стоимость часового расхода условного топлива, грн/ч	72,21				
Месячный фонд зарплаты с начислениями, тыс./мес.	60,00				
тоже в час, грн/ч	82,2				
Часовой расход мини-ТЭЦ, грн/ч	171,56				
Производство теплоты, Гкал/ч	0,083	0	0,149	0,206	0,293
Доля теплоты на генерацию электроэнергии	0,434	1,000	0,306	0,245	0,200
Генерация электроэнергии для потребителей, кВт	74,20	82,20	76,5	77,7	85,2
Расходы на мини-ТЭЦ, тыс. грн/пер.	275,5	72,49	51,0	115,4	153,0
Себестоимость электроэнергии, грн/(кВт·ч)	1,060	2,203	0,725	0,570	0,425
Себестоимость теплоты, грн/Гкал	1234,0	0,00	843,4	663,9	494,5

Таблица 3 – Результаты расчета годовых технико-экономических показателей мини-ТЭЦ установленной электрической мощностью 110 кВт с двумя ОРЦ каскадами, работающими с постоянной нагрузкой, при цене условного топлива (биомасса) 40 USD/т.у.т. без НДС

Величина	Режимы				
	Лето		Переходной	Начало зимы	Зима
	день	ночь	1	2	3
Продолжительность режима, ч	3615	951	669	1514	2007
Производство электроэнергии за период (тыс. кВт·ч)/пер.	268,2	78,2	51,2	117,6	171
Годовое производство электроэнергии (Э) (тыс. кВт·ч)/год	—				
Производство теплоты за период, Гкал/пер.	300	0	99,7	311,9	588
Годовое производство теплоты, Гкал/год	—				
Цена Э 2-го класса в сети, в том числе НДС, грн/(кВт·ч)	2,00				
Цена теплоты для потреб., в том числе НДС, грн/Гкал	2000,00				
Часовая прибыль мини-ТЭЦ, грн/ч	107,1	-30,4	232,2	339,0	512,2
Финансовые показатели за время режима, тыс. грн/пер.	387,2	-28,9	155,4	513,3	1028,1
– от продажи электроэнергии, тыс. грн/пер.	207,4	-28,9	56,7	148,6	240,8
– от продажи теплоты, тыс. грн/пер.	186,8	0	98,7	364,7	787,2
Всего годовая прибыль, тыс. грн/год	—				
Инвестиции, тыс. грн	2000 × 25 × 110 =				
Простой срок окупаемости, год	—				
	2,7				

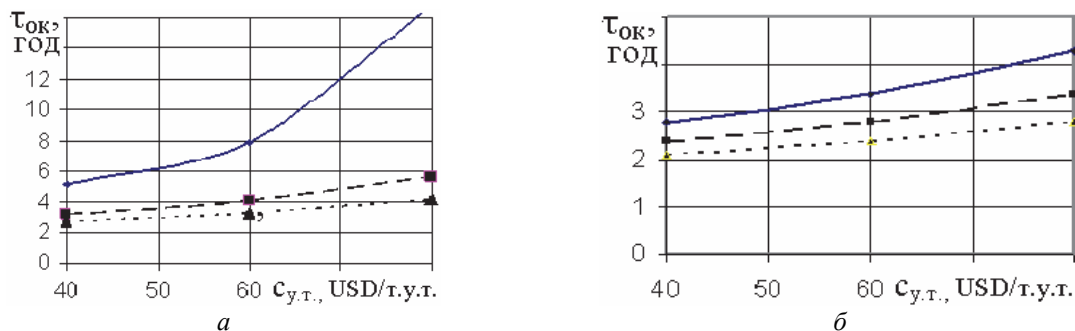


Рис. 2 – Изменение простого срока окупаемости проекта мини-ТЭЦ с двумя ОРЦ каскадами при удельной стоимости 2000 USD/кВт·э в зависимости от установленной электрической мощности: а – 110 кВт; б – 450 кВт, при цене на энергоносители; — $[c_3] = 1,8$ грн/(кВт·ч), $[c_Q] = 1800$ грн/Гкал; - - - $[c_3] = 2,0$ грн/(кВт·ч), $[c_Q] = 2000$ грн/Гкал; ····· $[c_3] = 2,2$ грн/(кВт·ч), $[c_Q] = 2200$ грн/Гкал

Как видно из табл. 3, при заданных ценах на энергоносители (условное топливо, электроэнергия, теплота) и удельную электрическую мощность установки срок окупаемости мини-ТЭЦ составляет 2,7 года.

Для оценки срока окупаемости мини-ТЭЦ при увеличении удельной стоимости оборудования достаточно умножить его на относительное увеличение удельной стоимости, то есть при удельной стоимости 2500 USD/кВт срок окупаемости составит 3,4 года, при 3000 USD/кВт – 4 года.

На подобных мини-ТЭЦ в летний период часто практикуют отключения станции. Как видно, при анализе данных табл. 3, при заданных ценах на энергоносители за летний период прибыль мини-ТЭЦ составляет ~358 тыс./пер., что свидетельствует в пользу работы станции.

Отключение станции летом в ночное время, не принесет прибыль, поскольку увеличит долю зарплаты в себестоимости электроэнергии и теплоты в другое время. Доля зарплаты в расходах ТЭЦ 82,2 грн/ч, если убытки меньше этой суммы (44,09 грн/ч, 220 грн/ночь и ~6600 грн/мес.), тогда часть зарплаты компенсируется. В случае останова станции зарплату дежурному персоналу необходимо платить.

Как видно из рис. 2а, при цене инвестиций 2000 USD/(кВт·э), реализация рассматриваемой мини-ТЭЦ установленной электрической мощностью 110 кВт является перспективной только при минимальной цене на условное топливо $C_{ут.} = 40$ USD/т.у.т. и ценах 2016 г. на электроэнергию $[c_3] = 2,2$ грн/(кВт·ч) и теплоту $[c_Q] = 2200$ грн/Гкал.

Интерес представляет исследование изменения сроков окупаемости рассматриваемой мини-ТЭЦ в зависимости от цен на энергоносители. Результаты таких исследований представлены на рис. 2.

Согласно рис. 2б, при минимальной цене инвестиций (2000 USD/(кВт·э)), реализация рассматриваемой мини-ТЭЦ установленной электрической

мощностью 450 кВтэ (350 кВтэ первый ОРЦ контур и 100 кВтэ – второй) при современных ценах на электроэнергию $[c_3] = 2,2$ грн/(кВт·ч) и теплоту $[c_Q] = 2200$ грн/Гкал перспективна при $C_{ут.} = 70$ USD/т.у.т.

Отметим, что для мини-ТЭЦ, работающей на биомассе, то есть на М.Т., считается, что длина маршрута доставки топлива не должна превышать 15–25 км [6]. Увеличение мощности энергоустановки приводит также к увеличению длины тепловых сетей, а следовательно, и тепловых потерь. Все перечисленное с учетом годового прироста биомассы [17], собственно, и определяет рациональную электрическую мощность рассматриваемой энергоустановки величиной 500–1000 кВтэ.

Подобная ситуация имеет место и при оценке инвестиций. С увеличением мощности мини-ТЭЦ удельная стоимость оборудования падает.

Таким образом, проект мини-ТЭЦ на биомассе мощностью 110 кВтэ при существующих ценах на энергоносители имеет срок окупаемости более 5 лет. Для уменьшения сроков окупаемости проекта целесообразно реализовывать мини-ТЭЦ на биомассе начиная с мощности 450–550 кВтэ, простой срок окупаемости такой станции при действительных ценах на энергоносители составит 2,7–4 года, в зависимости от удельной стоимости оборудования.

Продажа электроэнергии из биомассы по «зеленому тарифу» (0,1239 Евро/(кВт·ч)) сокращает срок окупаемости рассматриваемой ТЭЦ как минимум в 1,5 раза.

Использование мини-ТЭЦ на территории Украины

В соответствии с Государственным стандартом Украины (ДСТУ Б В.1.1-27:2010 [20]) территория разделена на климатические зоны (рис. 3). Продолжительность отопительного периода на территории Украины колеблется от 125 до 250 дней.



Рис. 3 – Районирование территории Украины по количеству градусо-дней отопительного периода [20]

В качестве примера была рассмотрена реализация энергетической установки на биомассе для г. Запорожье, имеющего средние значения по температурным показателям наружного воздуха. Для других регионов Украины такая установка будет типовой, что позволит обеспечить серийность мини-ТЭЦ на биомассе и уменьшит их стоимость.

Самый эффективный режим работы мини-ТЭЦ (КПД = 72,5 %), рассматриваемой схемы (рис. 1), реализуется при температуре наружного воздуха менее чем минус 5 °С (режим 3). В этом случае воздушный конденсатор отключен и нет потерь теплоты в окружающую среду при конденсации рабочего тела.

Следовательно, увеличение отопительного периода позволит поднять эффективности использования теплоты сжигаемого топлива за счет повышения продолжительности работы энергетической установки в когенерационном режиме выработки тепловой и электрической энергии.

Выводы

С целью определения основных технико-экономических показателей выполнен расчет характеристик четырех основных режимов работы мини-ТЭЦ, при комбинированной схеме, с рабочим телом R-600a (для климатических условий г. Запорожье):

– летний режим – дневной режим ГВС и с отключением подачи воды в ночное время (с 0 до 5 часов);

– 1 режим – начало и конец отопительного периода с температурой наружного воздуха в интервале +8 – +5 °С;

– 2 режим – продолжение (перед окончанием) отопительного периода с температурой наружного воздуха в интервале 0 – +5 °С;

– 3 режим – максимальный отпуск теплоты в период стояния минусовых температур наружного воздуха.

Показано, что при удельной стоимости 2000 USD/кВт·э инвестиций, реализация данной мини-ТЭЦ установленной электрической мощностью 110 кВт, является перспективной (срок окупаемости 3,2 года) только при цене на условное топливо меньше, чем $c_{у.т.} = 40$ USD/т.у.т. и ценах на электроэнергию [$c_{э}$] = 2,2 грн/(кВт·ч) и теплоту [$c_{т}$] = 2200 грн/Гкал. Если установленная электрическая мощность мини-ТЭЦ 450 кВт (350 кВт·э первый ОРЦ контур и 100 кВт·э – второй) при этих же ценах на электроэнергию и теплоту ее реализация перспективная до $c_{у.т.} = 70$ USD/т.у.т.

Таким образом, проект мини-ТЭЦ на биомассе мощностью 110 кВт·э при существующих ценах на энергоносители имеет срок окупаемости более 5 лет. Для уменьшения сроков окупаемости целесообразно реализовывать мини-ТЭЦ начиная с электрической мощности 450–550 кВт·э, простой срок окупаемости такой станции при современных ценах на энергоносители составит 2,7–4 года, в зависимости от удельной стоимости оборудования.

Следует отметить, что при продаже электроэнергии из биомассы по «зеленому тарифу»

(0,1239 Евро/(кВт·ч)) срок окупаемости данной мини-ТЭЦ сокращается в 1,5 раза.

Установленные государством преференции (+5 %) при использовании оборудования украинского производства сделают предлагаемые мини-ТЭЦ еще более конкурентными. Это можно утверждать, руководствуясь наличием производств в Украине: котельного оборудования, воздушных конденсаторов, разработок современных и эффективных проточных частей турбин на НРТ.

Мини-ТЭЦ на биомассе, с использованием ОРЦ технологии, будет являться универсальной для всех регионов Украины, что даст возможность обеспечить их серийность и позволит уменьшить стоимость.

Список литературы

- 1 Постанова Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р. Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України. – 2011. – № 942. – 5 с. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/942-2011-p>. – Загл. з екрану. – 13.01.2017.
- 2 Постанова Президії НАН України № 179 від 20 грудня 2013 р. Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014–2018 роки [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України. – 2013. – № 179. – 42 с. – Режим доступу: www.nas.gov.ua/text/CouncilOfPresidents/Napryamky.pdf. – Загл. з екрану. – 12.12.2016.
- 3 Гелету́ха, Г. Г. Анализ энергетических стратегий стран ЕС и мира и роли в них возобновляемых источников энергии. Аналитическая записка БАУ № 13 [Электронный ресурс] / Г. Г. Гелету́ха, Т. А. Железна, А. К. Праховник // Биоэнергетическая ассоциация Украины. – 2015. – 18 с. – Режим доступа: www.uabio.org/activity/uabio-analytics. – Загл. с экрана. – 26.11.2016.
- 4 Кожуховский, И. С. Концепция развития инфраструктуры электроснабжения и централизованного теплоснабжения на основе распределенной генерации и когенерации [Электронный ресурс]. – 2013. – 29 с. – Режим доступа: http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/09/2013_10_24_АПБЭ.pdf. – Загл. с экрана. – 10.12.2016.
- 5 США инвестируют в строительство 10 мини-ТЭЦ в Харьковской обл. [Электронный ресурс] / ЭлектроВести. Портал про электроснабжение. – 2015. – Режим доступа: http://elektrovesti.net/41896_ssha-investiruyut-v-stroitelstvo-10-mini-tets-v-kharkovskoy-obl. – Загл. с экрана. – 12.12.2016.
- 6 Матиюк, Л. Н. Основная концепция: «Биоэнергетическая деревня» [Электронный ресурс] / Л. Н. Матиюк // Специальное агентство по возобновляемым ресурсам (FNR). – Gölzow : Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe e.V., 2016. – 54 с. – Режим доступа: http://saee.gov.ua/sites/default/files/1_Bio.pdf. – Загл. с экрана. – 04.01.2017.
- 7 Шубенко, А. Л. Разработка каскадной тепловой схемы турбоустановки на низкокипящих рабочих телах для сельской энергетики / А. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, Н. Ю. Бабак, А. В. Сенецкий, В. П. Сарацин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 10(1232). – С. 13–24. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.02.
- 8 Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учеб. для вузов / Е. Я. Соколов. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.
- 9 Когенерационные технологии в энергетике на основе применения паровых турбин малой мощности [Текст] / А. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, А. В. Сенецкий, Н. Ю. Бабак // Институт проблем машиностроения НАН Украины. – Харьков, 2014. – 320 с. – ISBN 978-966-02-7059-6.
- 10 ГКД 34.09.108-98. Розподіл витрати палива на теплових електростанціях на відпущену електричну і теплову енергію при їх комбінованому виробництві. Методика / С. М. Герасимов, І. П. Винницький, Й. С. Мисак, Т. Г. Кахикало. – Львів : ЛьвівОРГРЕС, 1998. – 18 с.
- 11 Неженцев, В. В. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности / В. В. Неженцев, В. С. Дубовик. – Киев : Техника, 1990. – 128 с.
- 12 Перевод малой теплоэлектроцентрали на сжигание местного топлива в объемах, обеспечивающих ее работу в летнее время / А. Л. Шубенко, Н. Ю. Бабак, А. В. Сенецкий, С. В. Роговой // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 04(122). – С. 17–26. – ISSN 2218-1849.
- 13 Гелету́ха, Г. Г. Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома / Г. Г. Гелету́ха, Т. А. Железна, О. І. Дроздова // Промислова теплотехніка. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 57–63. – ISSN 0204-3602.
- 14 Зинченко, В. Энергия мискантуса. Дешевой нефти не будет! / В. Зинченко, М. Яшин // ЛесПром информ. – 2011. – № 6. – С. 134–140. – ISSN 1996-0883.
- 15 Передерий, С. Щепка как твердое биотопливо в Европе / С. Передерий // ЛесПром информ. – 2010. – № 5. – С. 132–135. – ISSN 1996-0883.
- 16 ДСТУ 2042-92. Брикети торф'яни на комунально-побутові потреби. Технічні умови. – Введено 01.01.1993. – Київ : Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 1993. – 4 с.
- 17 Тюрина, Э. А. Инновационные технологии переработки биомассы в экологически чистые топлива и электроэнергию / Э. А. Тюрина // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENROR-2013: матер. Первого Междун. форума 22–23 октября 2013 г. – Москва : Объединенный институт высоких температур РАН, 2013. – С. 361–363.
- 18 Мы делаем энергию зеленой! [Электронный ресурс] / Биоэнергетическая ассоциация Украины : официальный сайт. – 2016. – Режим доступа: <http://www.uabio.org/ru/>. – Загл. с экрана. – 20.12.2016.
- 19 Гнеушев, В. А. Логика сооружения и обеспечения биотопливом мини-ТЭЦ в Украине / А. В. Гнеушев, А. С. Стадник, Ю. А. Крохмалюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 07(101). – С. 44–52. – ISSN 2218-1849

20 ДСТУ Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. – Введено 01.11.11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.

Bibliography (transliterated)

- Cabinet of Ministers of Ukraine** (2011), "Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy no. 942 vid 7 veresnya 2011 r. Pro zatverdzhennya pereliku prioritetnih tematicnih napryamiv naukovih doslidzhen i naukovo-tehnicnih rozrobok na period do 2020 roku [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 942 on September 7, 2011. On approving the list of priority thematic areas of research and scientific and technological development for the period till 2020]", *Cabinet of Ministers of Ukraine*, No. 942, available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/942-2011-п> (accessed 13 January 2017).
- Cabinet of Ministers of Ukraine** (2013), "Postanova PrezidiY NAN Ukrainy no. 179 vid 20 grudnya 2013 r. Osnovni naukovi napryami ta nayvazhlivishi problemi fundamentalnih doslidzhen u galuzi prirodnicnih, tehnicnih i gumanitarnih nauk Natsionalnoy akademiy nauk Ukrainy na 2014–2018 roki [Resolution of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine no. 179 on December 20, 2013 The main research areas and the most important problems of basic research in the field of natural, technical and humanitarian sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine on 2014–2018]", *Cabinet of Ministers of Ukraine*, No. 179, available at: www.nas.gov.ua/text/CouncilOfPresidents/Napryamky.pdf (accessed 12 December 2016).
- Geletuha, G. G., Zheleznyaya, T. A. and Prahovnik, A. K.** (2015), "Analiz energeticheskikh strategiy stran ES i mira i roli v nih vobnovlyayemykh istochnikov energii. Analiticheskaya zapiska BAU № 13 [An analysis of the energy strategies of the EU and the world and the role into them of renewable energy sources. Analytical Note BAU number 13]", *Bioenergeticheskaya assotsiatsiya Ukrainy*, available at: www.uabio.org/activity/uabio-analytics (accessed 26 November 2016).
- Kozhuhovskiy, I. S.** (2013), "Kontseptsiya razvitiya infrastrukturyi elektrosnabzheniya i tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnove raspredelennoy generatsii i kogeneratsii [The concept of infrastructure development electric power supply and district heating based on cogeneration and distributed generation]", *Sankt-Peterburgskiy politehnicheskiy universitet Petra Velikogo*, available at: http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/09/2013_10_24_АПБЭ.pdf, (accessed 10 December 2016).
- (2015), "SShA investiruyut v stroitelstvo 10 mini-TETS v Harkovskoy obl. [United States to invest in the construction of 10 mini-CHP in the Kharkiv region]", *ElektroVesti. Portal pro elektrosnabzhenie*, available at: http://elektrovesti.net/41896_ssha-investiruyut-v-stroitelstvo-10-mini-tets-v-kharkovskoy-obl (accessed 12 December 2016).
- Matyuk, L. N.** (2016), "Osnovnaya kontseptsiya: "Bioenergeticheskaya derevnya" [The basic concept: "Bioenergy Village"]". *Special Agency for Renewable Resources (FNR)*, Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., available at: http://sae.gov.ua/sites/default/files/1_Bio.pdf, (accessed 04 January 2017).
- Shubenko, O., Malyarenko, V., Babak, M., Senetskiy, O. and Sarapin, V.** (2017), "Developing the Cascade Thermal Circuit for the Turbine Unit Operating on Low-Boiling Working Medium Intended for Agricultural Power Engineering", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 13–24, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.02.
- Sokolov, E. Ya.** (2006), "Teplofikatsiya i teplovyie seti: uchebnik dlya vuzov [District heating and heat networks: a textbook for high schools]", Publishing House MEI, Moscow.
- Shubenko, A. L., Malyarenko, V. A., Senetskiy, A. V. and Babak, N. Yu.** (2014), "Kogeneratsionnye tehnologii v energetike na osnove primeneniya parovykh turbin maloy moshchnosti [Cogeneration technologies in energy on based the use of low-power steam turbines]", *IPMach NAS of Ukraine*, Kharkov, ISBN 978-966-02-7059-6.
- Gerasimov, S. M., Vinnitskiy, I. P., Misak, Y. S. and Kahikalo, T. G.** (1998), "GKD 34.09.108-98. Rozpodil vitrati paliva na teplovih elektrostantsiyah na vidpuschenu elektrichnu i teplovu energiyu pri Yh kombinovanomu virobnitstvi. Metodika [GCD 34.09.108-98. fuel distribution at the thermal power stations for the supplied electricity and heat with their combined production. Methodology]", *LvivORGRES*, Lviv, Ukraine.
- Nezhentsev, V. V. and Dubovik, V. S.** (1990), "Povyishenie effektivnosti ispolzovaniya toplivno-energeticheskikh resursov v promyshlennosti [More efficient use of energy resources in the industry]", *Technik*, Kiev, Ukraine.
- Shubenko, A. L., Babak, N. Yu., Senetskiy, A. V. and Rogovoy, S. V.** (2014), "Perevod maloy teploelektrotsentrali na szhiganie mestnogo topliva v ob'emah, obespechivayuschih ee rabotu v letnee vremya [Translation of small heat and power plant on the local combustion of fuel in quantities that ensure its work in the summer time]", *Energy saving. Energy. Energy audit*, No. 04(122), pp. 17–26, ISSN 2218-1849.
- Geletuha, G. G., Zheleznyaya, T. A. and Drozdov, O. I.** (2013), "Kompleksnyy analiz tehnologii vyrobnistva energii z tverdoi biomasy v Ukraini. Chastyna 1. Soloma [Comprehensive analysis of the technologies of energy production from solid biomass in Ukraine. Part 1. Straw]", *Prom. teplotehnika*, Vol. 35, No. 3, pp. 57–63, ISSN 0204-3602.
- Zinchenko, V. and Yashin, M.** (2011), "Energiya miskantusa. Deshevoy nefi ne budet! [Energy miscanthus. Cheap oil will not!]", *LesProm inform*, No. 6, pp. 134–140, ISSN 1996-0883.
- Perederiy, S.** (2010), "Schepa kak tverdoe biotoplivo v Evrope [Wood chips as a solid biofuel in Europe]", *LesProm inform*, No. 5, pp. 132–135, ISSN 1996-0883.
- (1993), "DSTU 2042-92. Briketi torfyani na komunalno-pobutovi potrebi. Tehnicni umovi [DSTU 2042-92. Briquettes of peat for household needs. Technical conditions]", *State Committee for Standardization and Certification Ukraine*, Kiev, Ukraine.
- Tyurina, E. A.** (2013), "Innovatsionnye tehnologii pererabotki biomassy v ekologicheski chistye topliva i elektroenergiyu [Innovative technologies for processing biomass into clean fuel and electricity]", *Vobnovlyayemaya energetika. Puti povysheniya energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti REENROR-2013: mater.*

- Pervogo Mezhdun. foruma 22-23 oktyabrya 2013 g.*, pp. 361–363, Ob'edinennyi institut vysokih temperatur RAN, Moscow, Russia.
- 18 (2016), "My delaem energiyu zelenoy! [We make green energy!]", *Bioenergeticheskaya assotsiatsiya Ukrainy. Official website of the manufacturer*, available at: <http://www.uabio.org/ru/> (accessed 20 December 2016).
- 19 **Gneushev, V. A., Stadnik, A. S. and Krohmaluk, Yu. A.** (2012), "Logika sooruzheniya i obe-specheniya biotoplivom mini-TETS v Ukraine [Logic of construction and ensure biofuels mini-CHP in Ukraine]", *Energy saving. Energy. Energy audit*, No. 07 (101), pp. 44–52, ISSN 2218-1849.
- 20 (2011), "DSTU B V.1.1-27:2010. Budivelna klImatologiya [DSTU B V.1.1-27:2010. Construction climatology]", *Minregionbud Ukraine*, Kiev, Ukraine.

Сведения об авторах (About authors)

Шубенко Александр Леонидович – член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заведующий отделом оптимизации конструкций и процессов турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, ул. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина, 61046; e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0001-9014-1357.

Shubenko Oleksandr – Member-correspondent of National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Department Head in Optimization of Processes and Designs of Turbomachinery, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Бабак Николай Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела оптимизации конструкций и процессов турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины; ул. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина, 61046; e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua.

Babak Mykola – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Fellow, Senior Research Fellow in Optimization of Processes and Designs of Turbomachinery Department, A.N. Podgorny Institute For Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, , Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Сенецкий Александр Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела оптимизации конструкций и процессов турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, ул. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина, 61046; e-mail: aleksandr-seneckij@ukr.net, ORCID 0000-0001-8146-2562.

Senetskyi Oleksandr – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Fellow, Senior Research Fellow in Optimization of Processes and Designs of Turbomachinery Department, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Сарапин Владимир Павлович – главный конструктор отдела оптимизации конструкций и процессов турбомашин, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, ул. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина, 61046; e-mail: sarapin_v@mail.ru, ORCID 0000-0002-5323-5351.

Sarapin Volodymyr – Chief Designer in Optimization of Processes and Designs of Turbomachinery Department, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Шубенко, А. Л. Оценка технико-экономических показателей каскадной тепловой схемы турбоустановки на низкотемпературных рабочих телах / **А. Л. Шубенко, Н. Ю. Бабак, А. В. Сенецкий, В. П. Сарапин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 6–15. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.01.

Please cite this article as:

Shubenko, O., Babak, M., Senetskyi, O. and Sarapin, V. (2017), "Estimating the Engineering and Technical Performances for the Stage Thermal Circuit of Turbine Unit Operating on Low-Boiling Working Media", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1233), pp. 6–15, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.01.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Шубенко, О. Л. Оцінка техніко-економічних показників каскадної теплової схеми турбоустановки на низкотемпературних робочих тілах / **О. Л. Шубенко, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький, В. П. Сарапін** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 6–15. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.01.

АНОТАЦІЯ Наведено результати техніко-економічного аналізу з оцінки величини інвестицій і термінів окупності впровадження двокаскадної когенераційної установки малої потужності на низькотемпературному робочому тілі, з метою реалізації стратегії «біоенергетичного селища». Виконано дослідження з порівняння зміни термінів окупності даної міні-ТЕЦ в залежності від цін на енергоносії. Доцільно реалізовувати міні-ТЕЦ на біомасі починаючи з потужності 450–550 кВт-е, простий термін окупності такої станції при дійсних цінах на енергоносії складе 2,7–4 роки.
Ключові слова: енергозбереження, «біоенергетичне селище», низькотемпературне робоче тіло, тепла схема, електрична потужність, теплофікаційний і конденсаційний режими, техніко-економічні показники, окупність енергоустановки.

Поступила (received) 14.02.2017