

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

РАЗРАБОТКА КАСКАДНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ТУРБУУСТАНОВКИ НА НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ ДЛЯ СЕЛЬСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АННОТАЦИЯ Предложено совершенствование существующей тепловой схемы малой когенерационной турбоустановки электрической мощностью ~80 кВт путем подключения второго каскада. Приведены результаты расчетных исследований с использованием программного комплекса, разработанного в ИПМаш НАН Украины по оценке показателей мощности и экономичности замкнутых паротурбинных циклов на низкокипящих рабочих телах (НРТ) с учетом их свойств. Выполнен сравнительный анализ эффективности работы турбоустановки такого типа на когенерационном и конденсационном режимах.

Ключевые слова: энергосбережение, «биоэнергетическое село», низкокипящее рабочее тело, тепловая схема, турбина, электрическая мощность, теплофикационный и конденсационный режимы, тепло уходящих газов котла.

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

DEVELOPING THE CASCADE THERMAL CIRCUIT FOR THE TURBINE UNIT OPERATING ON LOW-BOILING WORKING MEDIUM INTENDED FOR AGRICULTURAL POWER ENGINEERING

ABSTRACT The modes of operation of the appropriate cogeneration unit of a low power (~80 kW) whose closed cycle uses a low-boiling working medium have been analyzed. The engineering solution on the improvement of power plant has been suggested. Realization of the two-cascade thermal circuit would allow us to operate mini-heat and power plants (HPP) both during the winter period and in summer provided that the electric power is increased by 20 to 25 kW. The available low-boiling working media for the second cascade were analyzed and those were selected that maximally meet the requirements set to the thermodynamic efficiency, operation performances, ecological safety and the operation reliability. Using the program system developed by the IPMash of the National Academy of Ukraine the team carried out computation investigations of thermal circuits for two-cascade power units. Performances for the power unit operating during the summer period on low-boiling working medium with hot water supply and in the condensation mode have been obtained; the electric efficiency for such modes will be equal on average to 22 % and 27 %, respectively. The computation data for the performances of the second cascade of mini-HPP with the working medium of R-600a were given for 100 % modes and partial modes used for the hot water supply (HWS) that showed the efficiency of the unit operation in the entire loading range. For the regular electric power generation by the cogeneration unit the option of thermal circuit with the parallel mounting of the boiler and the air capacitor at the turbine exhaust duct of the second cascade was calculated that would allow for the operation of the power system in any HWS mode.

Key words: power supply, "biopower village", low-boiling working medium, thermal circuit, turbine, electric power, cogeneration and condensation modes, and heat-carrying boiler gases.

Введение

Современные тенденции в энергетике связаны с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенных системах тепло- и электроснабжения [1, 2].

На сайте Биоэнергетической ассоциации Украины достаточно большое количество публикаций, в которых освещаются все три основных направления использования биомассы: непосредственное сжигание, получение биогаза или жидкого топлива [2–6]; представлены аналитические материалы по проблемам утилизации ВИЭ. В информационных источниках есть примеры и планы реализации соответствующих проектов, в том числе для Украины [7–9].

В обзоре [10] представлена ситуация в мире (по данным 20 ведущих производителей оборудования) по применению энергетических установок на базе ORC (*Organic Rankin Cycle*, ОРЦ) технологии, которая широко применяется для реализации мини-ТЭЦ на биомассе. Отмечается, что за по-

следние 10 лет, по состоянию на начало 2016 года, спрос на электрогенерирующие установки, при использовании биомассы, с применением ОРЦ технологии вырос более чем в 7 раз [1, 11, 12].

Наибольший интерес к развитию энергетики на базе ОРЦ технологии на биомассе последние годы наблюдается в Германии, Канаде, Италии, Австрии, где введены соответствующие генерирующие мощности. В основном, это установки электрической мощностью до 1 МВт. В 2016–2018 гг. готовятся к реализации проектов мини-ТЭЦ на базе ОРЦ циклов: Италия, Великобритания, Канада, Россия, Швейцария и др. [10]. При этом отмечается, что в России установки такого типа имеют электрическую мощность до 4 МВт. К сожалению, этот обзор не содержит информации об Украине.

При реализации ОРЦ циклов необходимо учитывать требования, предъявляемые к рабочим телам: термодинамические, эксплуатационные, экономические, экологические. Рабочие тела, полностью соответствующие перечисленным услови-

ям, найти затруднительно. В каждом отдельном случае выбирают низкокипящее рабочее тело (НРТ) с учетом конкретных условий работы машины и предпочтение следует отдавать таким, которые удовлетворяют большинству перечисленных требований [13].

Преимущества ОРЦ технологии

Энергетическая установка на основе ОРЦ включает котел, в котором сжигается биомасса. Продуктами сгорания нагревается НРТ, которое используется в турбине. Этот турбинный цикл имеет следующие преимущества [14–18]:

- отсутствие высокого давления пара в котле, поэтому обеспечивается безопасная работа котельного агрегата;
- низкие эксплуатационные расходы на техническое обслуживание;
- простое управление, не требуется постоянного присутствия лицензированного оператора;
- высокая эффективность турбины (до 85 %), даже при частичной нагрузке (до 10–20 %);

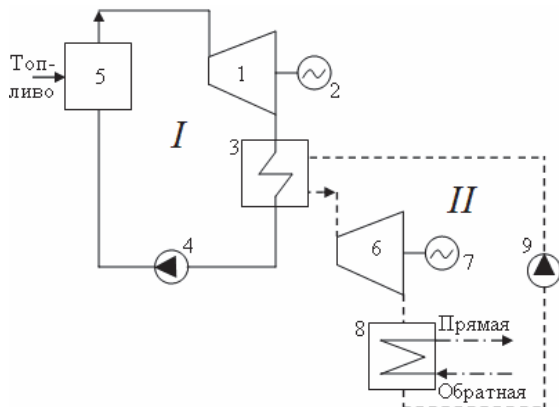


Рис. 1 – Принципиальная тепловая схема двухкаскадного паротурбинного цикла на НРТ: I – первый контур; II – второй контур; 1, 6 – турбина; 2, 7 – электрический генератор; 3, 8 – конденсатор; 4, 9 – конденсатный насос; 5 – котел

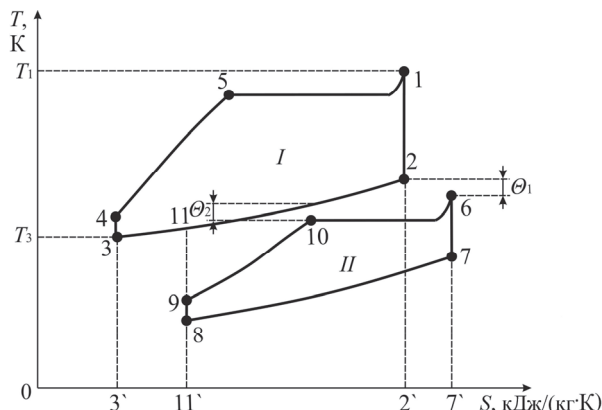


Рис. 2 – Тепловой процесс в T, S-диаграмме двухкаскадного паротурбинного цикла на НРТ

- низкие механические напряжения в элементах турбин;
- отсутствует эрозия лопаток;
- не требуется система водоподготовки;
- простая процедура пуска-останова;
- большой ресурс оборудования (> 20 лет).

Таким образом, исследования, связанные с разработкой современного когенерационного энергоисточника на биомассе для обеспечения теплотой и электроэнергией организаций, находящихся в ведении общины (дом совета, школа, медицинский пункт, детский сад, клуб, спорткомплекс и т. д.) является актуальной. Украина имеет все возможности для производства соответствующего оборудования, в перспективе по цене ниже зарубежной (например, на базе ПАО «Турбогаз», г. Харьков, разрабатывающей турбодетандеры).

В настоящем исследовании рассмотрен вопрос совершенствования когенерационной установки с использованием ОРЦ технологии электрической мощностью ~ 80 кВт.

Каскадные паротурбинные циклы

Для увеличения коэффициента использования теплоты сжигаемого топлива возможен вариант реализации ряда замкнутых паротурбинных циклов в одной тепловой схеме – так называемая каскадная схема (каскадное подключение). Это позволяет использовать скрытую теплоту конденсации рабочего тела первого контура в следующем контуре для подогрева и испарения его НРТ с более низким потенциалом (рис. 1) [19]. T, S-диаграмма термодинамического цикла такой электрогенерирующей установки приведена на рис. 2.

Общая электрическая мощность установки составит

$$N_{уст.}^э = N_{Iкаскад}^э + N_{IIкаскад}^э ,$$

где $N_{Iкаскад}^э$, $N_{IIкаскад}^э$ – электрическая мощность 1-го и 2-го каскадов. Использование второго каскада позволяет увеличить электрическую мощность установки на 40–50 % по отношению к первому каскаду, что приводит к соответствующему росту экономичности всей установки. Потеря теплоты с подогревом в теплообменнике 3 ограничивается только площадью $3'-3-11-11'$. Для максимального использования теплоты от рабочего тела первого контура в теплообменнике 3 поддерживается минимальное значение температурных напоров. Уменьшение потерь тепла с недогревами в промежуточных теплообменных аппаратах повышает экономичность двухкаскадной тепловой схемы.

Электрический КПД брутто электрогенерирующей установки такого типа можно определить по формуле

$$\eta_{луст.}^э = \frac{N_{Iкаскад}^э + N_{IIкаскад}^э}{Q_{подв}}$$

где $Q_{\text{подв}}$ – количество подведенного тепла в цикле.

Электрический КПД брутто многокаскадной тепловой схемы равен

$$\eta_{\text{луст.}}^{\text{э}} = \frac{N_{\text{каскад}}^{\text{э}} + \dots + N_{\text{пкаскад}}^{\text{э}}}{Q_{\text{подв}}}$$

Однако, в этом случае, ограничениями служат температура и давление конденсации последнего каскада. Электрическая мощность каждого последующего каскада будет составлять 40–50 %, по отношению к предыдущему, при этом увеличение стоимости каскадов будет расти не пропорционально мощности. Последнее ограничивает экономическую целесообразность реализации большого количества каскадов.

Проектирование и моделирование принципиальных тепловых схем

Проектирование принципиальных тепловых схем (ПТС) состоит в определении всех параметров в оборудовании и технологических связях по заданным проектным показателям. Для ПТС новых турбоустановок обычно проводятся полные исследования по рациональному выбору отдельных элементов и всей схемы в целом с оптимизацией наиболее важных параметров. Обычно, при проектировании тепловой схемы турбоустановки рассматриваются следующие вопросы:

- выбор начальных и конечных параметров пара;
- анализ необходимости реализации регенеративного подогрева рабочего тела до оптимальной температуры в подогревателях поверхностного типа (при решении поставленной задачи регенеративный подогрев отсутствует в связи с малыми параметрами рабочего тела);
- способ восполнения потерь рабочего тела (реализуется путем дозаправки соответствующим фреоном);
- выбор параметров теплоносителя и оптимальной схемы снабжения потребителей горячей водой;
- полезное использование сбросных потоков рабочего тела (когенерация).

Проектными показателями оборудования обычно служат:

- параметры пара и конденсата;
- недогрев в поверхностных теплообменниках;
- КПД оборудования;
- потери давления рабочего тела (практически отсутствуют, в связи с малыми длинами трубопроводов основного и вспомогательного оборудования).

Тепловые схемы паротурбинных установок (ПТУ) относятся к классу сложных технических систем. Основным способом изучения их внутрен-

ней структуры функционирования и внешних связей с окружающей средой, в настоящее время, является математическое моделирование.

Для решения поставленной задачи в работе использованы математическая модель и базовый программный комплекс для исследования замкнутых паротурбинных циклов, разработанный в ИПМаш НАН Украины и адаптированный авторами к условиям компоновки и эксплуатации различного оборудования, в том числе к условиям реализации тепловых схем, в замкнутых циклах, в которых используются НРТ [20–22]. Для заданных расчетных условий учтены термодинамические особенности фреонов, используемых при реализации ПТУ. Модель позволяет оценить электрическую мощность и КПД установок в зависимости от выбранного рабочего тела [23].

Объект и цель исследования

В качестве рабочего тела в ОРЦ цикле обогреваемой газами котла, работающего на биомассе, многими производителями органических турбин применяется диатермическое масло или его близкий аналог силикатное масло (*MDM*) [11, 24]. *P, h*-диаграмма с процессом расширения рабочего тела в турбине представлена на рис. 3. Как видно, *MDM* имеет существенный отрицательный наклон пограничной кривой.

Объектом исследования выбрана типовая схема ОРЦ контура с низкокипящим рабочим телом – *MDM*, представленная на рис. 4 с указанием значений основных расчетных характеристик.

Из рис. 4 видно, что температура *MDM* на входе в котел достаточно высока, температура уходящих газов, при этом не менее 180 °С. Для повышения эффективности работы котла тепловой потенциал этих газов необходимо использовать.

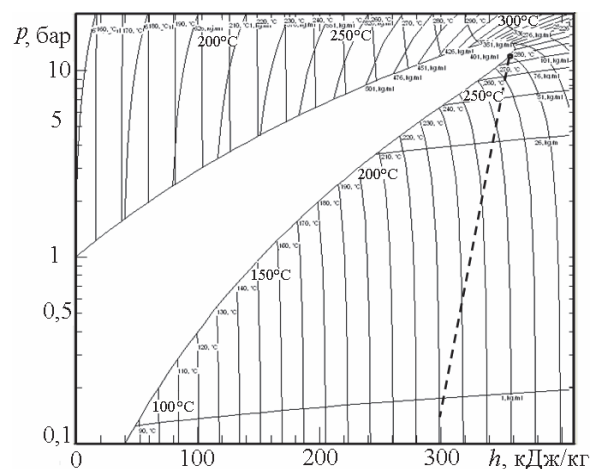


Рис. 3 – *P, h*-диаграмма для *MDM* с указанием процесса расширения пара в турбине

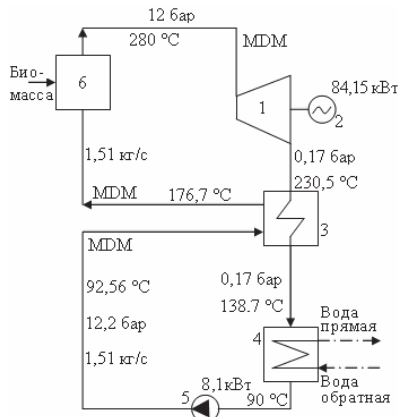


Рис. 4 – Принципиальная тепловая схема исходной когенерационной установки с ОРЦ контуром:
 1 – турбина; 2 – электрический генератор;
 3 – рекуператор; 4 – конденсатор (бойлер);
 5 – конденсатный насос; 6 – котел

Параметры пара *MDM* перед турбиной 12 бар и 280 °C выбраны вблизи критической точки на кривой насыщения (тепловая мощность котла 500 кВт). Расширение пара *MDM* в турбине реализуется до давления (0,17 бар) при температуре 230,5 °C с последующим охлаждением в рекуператоре до температуры 137,8 °C, при этом давлении температура конденсата составляет 90 °C. В рассматриваемой тепловой схеме теплота конденсации рабочего тела (*MDM*) эффективно используется после рекуператора для подогрева сетевой воды, направляемая на теплоснабжение. Электрический КПД замкнутого ОРЦ цикла базовой установки (без учета КПД котла на биомассе ~85% [18, 25]) составляет ~16%. Полезная электрическая мощность (при мощности сетевого и конденсатного насосов ~20 кВт), генерируемая для потребителей ~64 кВт. На теплоснабжение отпускается ~373 кВт (0,32 Гкал/ч).

В летний период, потребность в таком количестве отпускаемого тепла отсутствует, и возникает вопрос о работоспособности предложенной однокаскадной ОРЦ схемы.

Таким образом, можно сформулировать следующие цели работы при условии постоянного расхода топлива и поддержании номинальной электрической мощности контура на *MDM*:

- выбор рабочих тел под соответствующие параметры источника теплоты;
- разработка рациональной компоновки тепловой схемы;
- расчетные исследования энергетической установки в зависимости от режима эксплуатации;
- анализ полученных результатов и выбор наиболее подходящего рабочего тела.

Расчетные исследования тепловых схем паротурбинных циклов на различных рабочих телах выполнены с учетом физических и термодинамических свойств рассматриваемых НРТ.

Выбор рабочего тела второго контура и его параметров. Усовершенствованная тепловая схема

Как отмечалось ранее, выбор рабочих тел для второго контура ОРЦ цикла осуществлялся с учетом предъявляемых требований.

Подбор параметров второго контура проводился исходя из результатов проведенного анализа работы когенерационной установки (рис. 4).

При подборе параметров НРТ для второго каскада принималось:

- начальная температура теплоносителя греющего второй каскад, соответствует параметрам пара на выходе из рекуператора (см. рис. 4);
- температура рабочего тела на выходе из турбины обеспечивает температурный график горячего водоснабжения, а при конденсационном режиме – отвечает возможностям системы охлаждения.

Начальное давление пара для второго каскада выбрано в соответствии с принятой температурой по тепловым диаграммам, с таким расчетом, чтобы действительный процесс расширения пара заканчивался вблизи пограничной кривой сухости.

На рис. 5 представлена двухкаскадная тепловая схема исследуемой энергоустановки после подключения второго контура к основному (рис. 4).

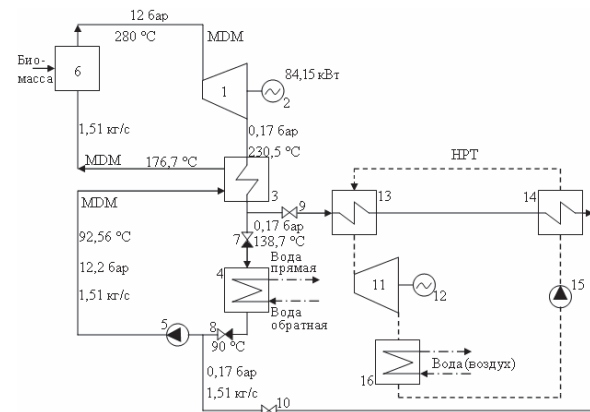


Рис. 5 – Принципиальная тепловая схема энергоустановки, усовершенствованной вторым ОРЦ контуром: 7, 8, 9, 10 – задвижки; 11 – турбина; 12 – генератор; 13, 14 – конденсатор-испаритель; 15 – конденсатный насос; 16 – конденсатор

При закрытии задвижек 7, 8 и открытии задвижек 9, 10, греющая среда после рекуператора 1-го каскада направляется в подогреватели 13 и 14 (рассчитываются как один подогреватель, в котором происходит процесс нагрева и конденсации), где рабочее тело второго каскада нагревается до параметров, необходимых на входе в турбину 11 с электрогенератором 12. Далее, после турбины, НРТ в перегретом состоянии направляется в подогреватель 16, где и конденсируется, отдавая

скрытую теплоту конденсации воде для горячего водоснабжения (ГВС). Конденсатный насос 15 поднимает давление НРТ и направляет его в подогреватель 13, цикл замыкается.

Работа второго каскада может быть реализована как в зимний, так и в летний периоды, при этом турбина 1-го каскада всегда работает на номинальной мощности.

Электрическая мощность второго каскада является целевой функцией проведения дальнейших исследований. Изменение значения последней, при варьировании параметрами пара на входе в турбину 2-го каскада на различных НРТ, должно показать целесообразность реализации двухкаскадной тепловой схемы.

Расчетные исследования

Согласно поставленной задаче, проведены расчетные исследования для различных рабочих тел. В качестве примера представлены результаты с применением для замкнутого паротурбинного цикла R-600a, по своим термодинамическим свойствам подходящего для случая реализации энергетической установки при заданных условиях. P, h -диаграмма для R-600a представлена на рис. 6.

На рис. 7 и 8 представлены варианты тепловой схемы исследуемой энергоустановки с расчетными характеристиками при работе в летний период (теплообменник 4 – отключен) на ГВС и конденсатор, охлаждаемый циркуляционной водой (конденсационный режим – К), соответственно.

Исследовались два варианта начала процесса расширения R-600a в турбине 2-го каскада: существенно перегретый пар с параметрами $\sim 120^\circ\text{C}$, 20 бар (вариант 1a, см. рис. 6 и рис. 7), $\sim 115^\circ\text{C}$, 20 бар (вариант 1б) и пар с параметрами близкими к линии насыщения $t_0 = 102^\circ\text{C}$, $P_0 = 20$ бар (вариант 2, рис. 6). Заканчивались рассматриваемые процессы расширения 1a и 1б, соответственно, с параметрами пара $t_k = 98,8^\circ\text{C}$, $P_k = 11$ бар и $t_k = 24^\circ\text{C}$, $P_k = 3,5$ бар, а 2–2a и 2–2б, соответственно, с параметрами пара $t_k = 75,8^\circ\text{C}$, $P_k = 10$ бар и $t_k = 46,2^\circ\text{C}$, $P_k = 3,5$ бар. В первом случае температура конденсации пара 70°C , во втором – 24°C .

Смещение процесса расширения пара в турбине 2-го каскада к линии насыщения приводит к снижению параметров R-600a на входе в турбину, при этом на режиме ГВС расход увеличивается с 1,02 до 1,17 кг/с, а электрическая мощность турбины с 20 до 24 кВт; на К режиме расход увеличивается: с 0,74 до 0,92 кг/с, а электрическая мощность турбины с 45 до 49 кВт (рост мощности на 10%).

В табл. 1 представлены результаты расчета работы 2-го каскада мини-ГЭЦ на R-600a на базовом (выделен жирным) и частичных режимах.

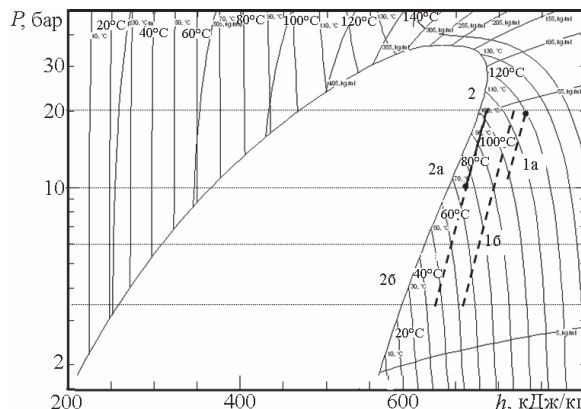


Рис. 6 – P, h -диаграмма для R-600a с указанием процесса расширения пара в турбине

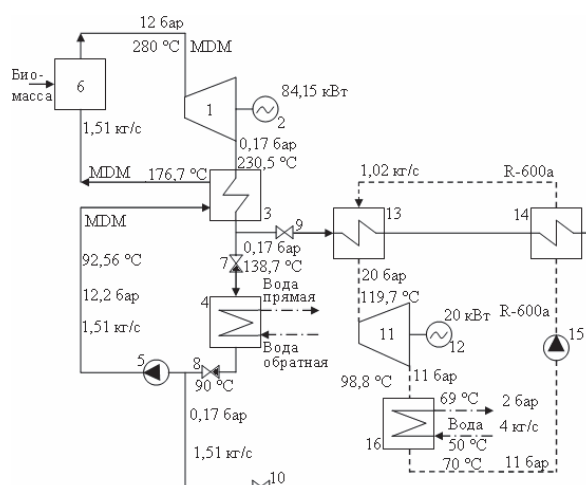


Рис. 7 – Принципиальная тепловая схема энергоустановки с ГВС

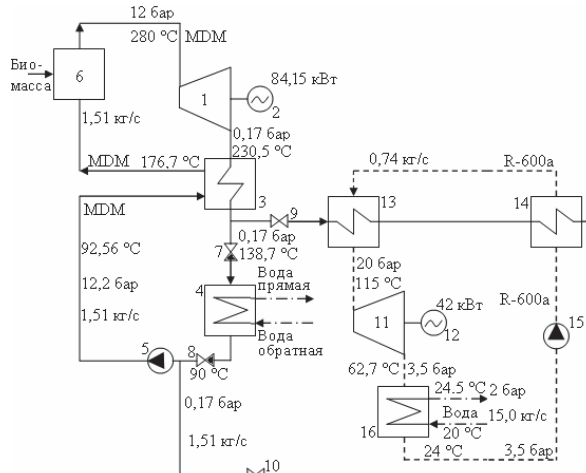


Рис. 8 – Принципиальная тепловая схема энергоустановки в конденсационном режиме

Данные табл. 1, позволяют оценить показатели мини-ГЭЦ при работе с частичной нагрузкой ГВС в летний период, а также в начале и конце отопительного периода. Согласно имеющимся данным, летняя нагрузка ГВС рассматриваемой мини-ГЭЦ должна составлять $\sim 0,083$ Гкал/ч, то

есть второй каскад должен работать на тепловой нагрузке 100 кВт (~30 %), что соответствует режиму работы практически без производства электроэнергии (табл. 1).

Отопительный период на исследуемой мини-ТЭЦ (по имеющимся данным) должен начи-

наться и заканчиваться с нагрузкой 0,149 Гкал/ч (генерация 2-го контура ~6 кВт, см. табл. 1).

В интервале температур наружного воздуха от 0 до +5 °С средняя отопительная нагрузка на исследуемой мини-ТЭЦ составляет 0,206 Гкал/ч (генерация 2-го контура ~12,9 кВт, см. табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные характеристики 2-го каскада мини-ТЭЦ с рабочим телом R-600a на 100 % и частичных режимах при наличии ГВС

Подведено теплоты от 1-го каскада	Режим	Параметры пара				Расход пара R-600a	Электрическая мощность		Отпущено теплоты на ГВС
		на входе в турбину		на выходе из турбины			потребление насосом	генерация	
$Q_{\text{подв}}$, кВт	$\bar{Q}_{\text{подв}}$, %	t_0 , °С	P_0 , бар	t_k , °С	P_k , бар	D_0 , кг/с	$N_{\text{пн}}$, кВт	$N_{\text{г}}$, кВт	$Q_{\text{ГВС}}$, Гкал/ч
373,8	100	102	20	75,8	10	1,17	3	24	0,293
307	83	95	18,2	72,7	10	1,0	2,2	18	0,249
258	69,7	90	16,5	71,8	10	0,85	1,5	13	0,211
209	56,5	85	14,9	70,8	10	0,7	0,9	8	0,172
161	43,5	80	13,5	69,5	10	0,55	0,5	5	0,133
115	31,1	75	12,1	68,5	10	0,4	0,23	2	0,095

Таблица 2 – Характеристики энергоустановки при работе в летний период второго каскада с различными НРТ на горячее водоснабжение при нагревании MDM в котле первого каскада с 176,7 до 280 °С и его расходе 1,51 кг/с

Рабочее тело	Расход НРТ в цикле, кг/с	Параметры НРТ на турбину		Расход сетевой воды ГВС кг/с (т/ч)	Температура обратной/прямой воды ГВС, °С	Электрическая мощность			Суммарный электрический КПД двух контуров ¹⁾ , %
		на входе бар/°С	на выходе бар/°С			первого каскада, кВт	второго каскада, кВт	двух каскадов, кВт	
R-124	2,06	20/120	9/93,1	2,5 (9,3)	50/80	84,15	23	107,15	23,36
R-134a	1,71	20/99,4	11/77,3	5,2 (18,7)	30/44,5	84,15	19	103,15	22,24
R-142b	1,8	25/124,9	12/92,6	3,35 (10,9)	50/72	84,15	24	108,15	23,64
R-236fa	2,33	20/120	10/98,3	2,47 (8,9)	50/80	84,15	19	103,15	22,24
R-600a	1,02	20/119,7	11/98,8	4,0 (14,4)	50/69,5	84,15	20	104,15	21,96

Таблица 3 – Характеристики энергоустановки при работе второго каскада в летний период с различными НРТ на конденсатор при нагревании MDM в котле первого каскада с 176,7 до 280 °С и его расходе 1,51 кг/с

Рабочее тело	Расход НРТ в цикле, кг/с	Параметры НРТ на турбину		Расход охлаждающей воды, кг/с (т/ч)	Тем-ра охлаждающей воды, °С	Электрическая мощность			Суммарный электрический КПД двух контуров ¹⁾ , %
		на входе, бар/°С	на выходе, бар/°С			первого каскада, кВт	второго каскада, кВт	двух каскадов, кВт	
R-124	1,76	20/120	4,5/74,3	14,05 (50,58)	20/25	84,15	38	122,15	27,56
R-134a	1,53	20/99,3	7/62,7	13,1 (47,16)	20/25,4	84,15	30	114,15	25,32
R-142b	1,4	20/109,7	3,5/47,8	11,5 (41,4)	20/26	84,15	45	129,15	29,52
R-236fa	1,7	20/120	3,0/71,7	13,9 (50,04)	20/25	84,15	41,5	125,65	28,54
R-600a	0,74	20/115	3,5/62,7	15,0 (54)	20/24,5	84,15	42	126,15	28,40

¹⁾ Без учета КПД котла на биомассе.

Выбор эффективного рабочего тела для реализации второго каскада энергоустановки

В результате расчетных исследований определены расходные и параметрические характеристики выбранных НРТ в опорных точках тепловой схемы, а также энергетические показатели мини-ТЭЦ, которые для удобства сравнения представлены в табл. 2 и 3. Из этих таблиц видно, каким образом меняются параметры в замкнутом цикле

второго каскада в зависимости от выбранного рабочего тела.

Термодинамические свойства фреонов 2-го контура и параметры пара перед турбиной влияют на характеристики энергоустановки в целом. В зависимости от параметров рабочего тела мощность 2-го контура установки меняется:

- при наличии ГВС в диапазоне 19–24 кВт;
- при сбросе пара в конденсатор 30–45 кВт.

Как видно из таблиц максимальная электрическая мощность 2-го каскада как при наличии ГВС, так и при работе на конденсатор достигается на рабочем теле R-142b. С практической же стороны, поскольку более доступен (дешевый) фреон R-600a, именно его целесообразно использовать для второго каскада энергоустановки. Уменьшение генерации электрической мощности во втором контуре при использовании R-600a, по сравнению с применением R-142b составляет всего ~3 кВт.

Следует отметить, что представленные результаты исследования влияния выбранного рабочего тела на характеристики 2-го каскада и энергоустановки при вариантах работы на ГВС и конденсатор носили в большей мере методический характер.

Это связано с тем, что с одной стороны, вариант работы на ГВС, с точки зрения КПД цикла энергоустановки более выгоден, поскольку в этом случае потери энергии меньше, чем при конденсационном варианте. С другой стороны, для работы летом в систему ГВС нужно отпускать 0,083 Гкал/ч теплоты, причем работа этой системы на теплосеть малой длины летом в ночное время практически невозможна (обратная вода из-за отсутствия водоразбора приходит с температурой близкой к температуре прямой воды) [26]. Выключения летом когенерационной ОРЦ энергоустановки в ночное время с 0 до 5–6 часов, существенно, снижает ее экономические показатели.

Решить проблему изменения тепловой нагрузки мини-ТЭЦ на ГВС летом можно, организовав параллельную работу рассматриваемой энергоустановки на ГВС и на конденсатор. Результаты исследования такой установки, работающей на R-600a, представлены далее.

Двухкаскадная энергоустановка при параллельном подключении бойлера ГВС и конденсатора

Как отмечалось ранее, особенностью ГВС является непостоянство тепловой нагрузки в течение суток (ночью водоотбор практически отсутствует), что необходимо учитывать при работе энергетической установки, особенно в летний период. Необходимо учитывать, что не всегда имеется возможность обеспечить охлаждение пара после турбины циркуляционной водой, в связи с этим приведем пример использования воздушного конденсатора (ВК).

Бесперебойный режим работы мини-ТЭЦ можно обеспечить, установив параллельно подогревателю 16 воздушный конденсатор 17 (далее комбинированный вариант). В зависимости от режима работы задвижки 18–21 открываются или закрываются соответствующим образом (рис. 9). На рис. 9 представлены расчетные характеристики

тепловой схемы энергоустановки с рабочим телом R-600a в летний период при таком подключении.

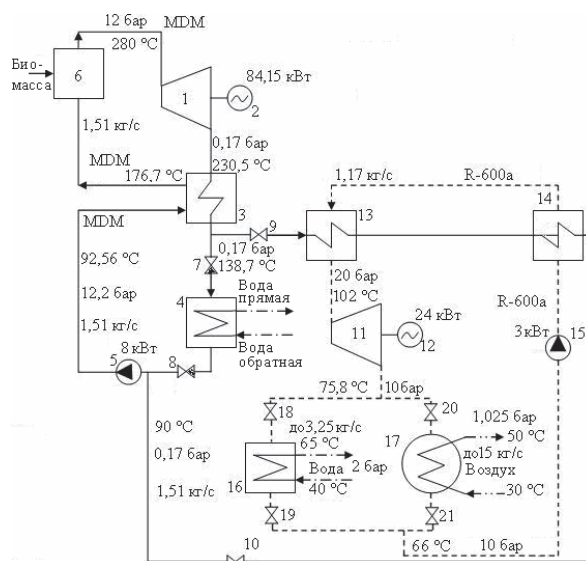


Рис. 9 – Принципиальная тепловая схема энергоустановки с рабочим телом R-600a, комбинированный вариант: 16 – подогреватель горячей воды; 17 – воздушный конденсатор; 18, 19, 20, 21 – задвижки

При максимальной нагрузке ВК (температура наружного воздуха +40 °C) мощность вентиляторов составит 15 кВт, а при максимальной ГВС мощность сетевого насоса принята ~12 кВт (зависит от рельефа местности). Сброс теплоты R-600a после турбины в ВК при отсутствии ГВС приведет к потерям, однако обеспечит работу 1-го контура на номинальном режиме, при покрытии почти всех своих потребностей установкой 2-го каскада, то есть без отпуска теплоты обеспечит отпуск потребителям ~82 кВт электрической мощности (КПД нетто энергоустановки ~14 %).

Особенностью такой установки является возможность ее работы не только в летний период, но и в зимний. В отопительный период первый каскад работает с номинальной нагрузкой вне зависимости от температуры наружного воздуха, а второй каскад на R-600a должен обеспечивать теплоснабжение и ГВС (по аналогии с тепловым пунктом), излишки же теплоты сбрасываются в ВК. В табл. 4 представлены основные энергетические характеристики оборудования исследуемой мини-ТЭЦ на основных режимах.

Как видно из данных табл. 4, самый неэффективный режим работы мини-ТЭЦ по комбинированной схеме (КПД = 14 %) – это чисто конденсационный режим, который имеет место летом в ночной период, его суточная продолжительность с 0 до 5 часов ночи. Режим ГВС, реализуемой в конце суток (обозначен в табл. 4 как летний), имеет более чем в два раза лучше КПД (29 %) по сравнению с чисто конденсационным режимом.

Самый эффективный режим работы мини-ТЭЦ по комбинированной схеме (КПД = 72,5 %) реализуется при температуре наружного воздуха менее чем минус 5 °С (режим 3, в табл. 4). В этом случае ВК отключен и в нем нет потерь теплоты.

Режимы 1 и 2 в табл. 4 реализуются в начале отопительного периода и характеризуются

средними показателями между летним режимом и зимним 3.

Пользуясь данными табл. 4, можно определить экономическую эффективность работы мини-ТЭЦ с комбинированным вариантом схемы. Технико-экономический расчет показателей, исследуемой энергоустановки, будет представлен в следующей публикации.

Таблица 4 – Энергетические затраты двухкаскадной энергоустановки на расчетных режимах при комбинированной схеме (Запорожский регион)

№ режима	Температура наружного воздуха, °С	Продолжительность режима, ч	1-й каскад			
			Электрическая мощность		количество теплоты, подведенное ко 2-му каскаду, кВт (Гкал/ч)	
			генерация, кВт	потребляемая питательным насосом, кВт		
лето	+5 <	3615	84,2	8	373,8 (0,3212)	
	+5 < ніч	951 (5 ч)				
1	+5... +8	669				
2	0...+5	1514				
3	< -5	2007				
2-й каскад						
№ режима	Электрическая мощность:				Потери теплоты в ВК, кВт	
	генерация, кВт	потребляемая вентилятором ВК, кВт	потребляемая конденсатным насосом, кВт	потребляемая сетевым насосом, кВт		
лето	24	13	3	10	244,4	
		15		0	341,1	
1		8,7		12	167,6	
2		7,5				101
3		0				0
Мини-ТЭЦ						
№ режима	Доля затрат на производство электроэнергии	Отпускаемая электрическая мощность, кВт	Отпускаемая теплота потребителям, Гкал/ч	Температура прямой воды, °С	КПД нетто термический	
лето	0,434	74,2	0,083	70	0,290	
	1	82,2	0	–	0,140	
1	0,306	76,5	0,149	48	0,425	
2	0,246	77,7	0,206	56	0,540	
3	0,200	85,2	0,293	68	0,725	

Выводы

Исследовалась возможность утилизации 500 кВт тепловой мощности, получаемой от котла на биомассе, с помощью когенерационной энергоустановки на базе турбинного цикла с НРТ, предлагаемой для автономного электро- и теплоснабжения общественных зданий небольших населенных пунктов.

В качестве рабочего тела в исходной тепловой схеме принят теплоноситель *MDM* с докритическими параметрами, генерируемая электрическая мощность составила 84,15 кВт (КПД НРТ цикла брутто 16,9 %), количество тепла, отпускаемого потребителям 0,321 Гкал/час. Высокая температура *MDM* за турбиной, проблемы обеспечения ГВС в летний период привели к решению о

реализации второго каскада турбинного цикла на НРТ.

Исследованы возможности повышения электрического КПД энергоустановки за счет двухкаскадного турбинного цикла на НРТ и выбора различных рабочих тел: R-124, R-134a, R-142b, R-236fa, R-600a, а также параметров пара низкого рабочего тела перед турбиной (значительно перегретый пар или пар с параметрами близкими к линии насыщения в докритической области). Анализировалось два варианта реализации тепловой схемы энергоустановки: с отпуском теплоты температурой 70 °С (ГВС) и чисто конденсационный режим.

Как показали расчеты, для исследованных рабочих тел при схеме для ГВС электрическая мощность, генерируемая 2-м каскадом, находилась

в диапазоне 19–24 кВт, при конденсационном режиме – 30–45 кВт.

Причем при выборе параметров НРТ перед турбиной на пограничной кривой в области 10–15 °С ниже критической точки, генерация на 2–3 кВт была выше, чем при большем перегреве пара в цикле, причем как при схеме с ГВС, так и конденсационном варианте.

Лучшим для использования, в качестве рабочего тела, при реализации второго контура предлагаемой когенерационной установки, признан фреон R600a, как более доступный (дешевый) и обеспечивающий незначительное уменьшение генерации электроэнергии во 2-м каскаде (до 3 кВт) по сравнению с другими рабочими телами.

Анализ режимов работы малых ТЭЦ в летний период на ГВС с расходом 1/6 теплоснабжения, определил проблемы с работой станции на сеть малой протяженности в ночное время. Предложено для обеспечения непрерывной работы мини-ТЭЦ использовать комбинированную тепловую схему станции, в этом случае 2-й НРТ каскад работает на бойлер для ГВС и воздушный конденсатор (или один из этих аппаратов). Предлагаемое техническое решение обеспечивает круглогодичную работу генерирующего оборудования на постоянной номинальной нагрузке, что способствует ускоренной окупаемости проекта.

Список литературы

- 1 **Гелетуа, Г. Г.** Анализ энергетических стратегий стран ЕС и мира и роли в них возобновляемых источников энергии. Аналитическая записка БАУ № 13 [Электронный ресурс] / **Г. Г. Гелетуа, Т. А. Железная, А. К. Праховник** // Биоэнергетическая ассоциация Украины. – 2015. – 18 с. – Режим доступа: www.uabio.org/activity/uabio-analytics. – Загл. с экрана. – 26.11.2016.
- 2 **Кожуховский, И. С.** Концепция развития инфраструктуры электроснабжения и централизованного теплоснабжения на основе распределенной генерации и когенерации [Электронный ресурс] / **И. С. Кожуховский** // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 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.
- 3 Мы делаем энергию зеленой! [Электронный ресурс] / Биоэнергетическая ассоциация Украины : официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.uabio.org/ru/>. – Загл. с экрана. – 20.12.2016.
- 4 **Гелетуа, Г. Г.** Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з твердої біомаси в Україні. Частина 1. Солома / **Г. Г. Гелетуа, Т. А. Железна, О. І. Дроздова** // Пром. теплотехніка. – 2013. – Т. 35, № 3. – С. 57–63. – ISSN 0204-3602.
- 5 **Железная, Т. А.** Обзор современных технологий газификации биомассы / **Т. А. Железная, Г. Г. Гелетуа** // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 61–75. – ISSN 0204-3602.
- 6 **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.
- 7 **Тюрин, Э. А.** Инновационные технологии переработки биомассы в экологически чистые топлива и электроэнергию / **Э. А. Тюрин** // Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENROR-2013: матер. Первого Междуна. форума 22–23 октября 2013 г. – Москва : Объединенный институт высоких температур РАН, 2013. – С. 361–363.
- 8 **Дикаленко, М.** В Украине масса отходов, достойных называться биотопливом, как и котельных, достойных его использовать [Электронный ресурс] / **М. Дикаленко** // Ежедневный информационный дайджест «ТЭК И ПРЕССА». – 2013. – Режим доступа: <http://uaenergy.com.ua/post/17054/v-ukraine-massa-othodov-dostojnyh-nazyvatsya>. – Загл. с экрана. – 15.12.2016.
- 9 США инвестируют в строительство 10 мини-ТЕЦ 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.
- 10 **Tartière, Thomas.** ORC Market: A World Overview [Electronic resource] / **Thomas Tartière** // Thomas Tartière. – 2016. – Mode of access: <http://orc-worldmap.org/analysis.html>. – Title from a screen. – 20.12.2016.
- 11 Мини-ТЭЦ на древесной биомассе. Комбинированное производство электрической и тепловой энергии (когенерация) [Электронный ресурс] / ООО «ВАДО инжиниринг» : официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.vadogroup.com/index.php/ru/>. – Загл. с экрана. – 12.12.2016.
- 12 **Obernberger, I.** Obernbergen Ingwald Description and evaluation of the new 1,000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Liens, Austria / **I. Obernberger, P. Thonhofer, E. Reishofer** // Euroheat & Power. – 2002. – Vol. 10. – P. 41–48.
- 13 **Базаев, А. Р.** Исследование термодинамических свойств смесей технически важных веществ как эффективных теплоносителей в энергетических установках / **А. Р. Базаев** // ФИЗИКА. – 2007. – СІЛД XIII, № 1–2. – С. 57–60.
- 14 Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкотемпературными рабочими телами / **Б. Билека, Е. Васильев, В. Кабков, Д. Костенко, В. Избаш, В. Коломеев** // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 5. – С. 6–10.
- 15 **Редько, А. А.** Термодинамические параметры геотермальной электрической станции с бинарным сверхкритическим циклом / **А. А. Редько** // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2009. – № 4. – С. 81–85.
- 16 **Пятничко, В. А.** Утилизация низкопотенциального тепла для производства электроэнергии с использованием пентана в качестве рабочего тела / **В. А. Пятничко, Т. К. Крушевнич, А. И. Пятничко** // Экология и ресурсосбережение. – 2003. – № 4. – С. 3–6.

- 17 **Гринман, М. И.** Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами / **М. И. Гринман, В. А. Фомин** // Энергомашиностроение. – 2006. – № 1. – С. 63–69.
- 18 Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов посредством установки турбины на низкокипящем рабочем теле / **А. Л. Шубенко и др.** // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 6. – С. 18–26.
- 19 Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / **М. М. Гришутин, А. П. Севастьянов, Л. И. Селезнев, Е. Д. Федорович.** – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 219 с. – ISBN 5-217-00076-7.
- 20 **Лыхвар, Н. В.** Гибкие математические модели энергоустановок для оптимизации режимов ТЭЦ / **Н. В. Лыхвар** // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: сб. научн. трудов. – Харьков : Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2003. – Т. 2. – С. 413–419.
- 21 **Лыхвар, Н.В.** Моделирование теплоэнергетических установок с использованием интерактивной схемной графики / **Н. В. Лыхвар, Ю. Н. Говорушенко, В. А. Яковлев** // Пробл. машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 30–41.
- 22 **Шубенко, А. Л.** Рациональное распределение нагрузок между турбинами энергоузла промышленного предприятия в процессе эксплуатации / **А. Л. Шубенко, Н. В. Лыхвар, А. В. Сенцкий** // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2009. – № 12(70). – С. 26–34.
- 23 Когенерация в котельных на основе органического цикла Ренкина / **С. Ю. Андреев и др.** // Комунальне господарство міст. Сер. Технічні науки та архітектура. – Харків : ХНАМГ, 2016. – № 130. – С. 55-64. – ISSN 0869-1231.
- 24 **Матиюк, Л. Н.** Основная концепция: «Биоэнергетическая деревня» [Электронный ресурс] / **Л. Н. Матиюк** // Специальное агентство по возобновляемым ресурсам (FNR). – Gölzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2016. – 54 с. – Режим доступа: http://sae.gov.ua/sites/default/files/1_Bio.pdf. – Загл. с экрана. – 04.01.2017.
- 25 Твердотопливные котлы с высокотемпературным органическим теплоносителем [Электронный ресурс] / Компания «Феликс Энерджи Групп» представитель в Украине ОАО «Головное специализированное конструкторское бюро по комплексу оборудования для микроклимата»: официальный сайт. – Режим доступа: http://f-g.com.ua/tverdoplivnyye_kotly_s_vysokotemperaturnym_organicheskim_teplosositelem_html. – Загл. с экрана. – 08.12.2016.
- 26 **Соколов, Е. Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / **Е. Я. Соколов.** – Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.
- Bibliography (transliterated)**
- 1 **Geletuha, G. G., Zheleznyaya, T. A. and Prahovnik, A. K.** (2015), "Analiz energeticheskikh strategiy stran ES i mira i roli v nih vozobnovlyayemykh 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).
- 2 **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_AПБЭ.pdf (accessed 26 December 2016).
- 3 (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 Desember 2016).
- 4 **Geletuha, G. G., Zheleznyaya, T. A. and Drozdov, O. I.** (2013), "Kompleksnyy analiz tehnologiy vyrobništva 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. teplotekhnika*, Vol. 35, No. 3, pp. 57–63, ISSN 0204-3602.
- 5 **Zheleznyaya, T. A., Geletuha, G. G.** (2006), "Obzor sovremennykh tehnologiy gazifikatsii biomassy [Review of modern biomass gasification technology]", *Prom. teplotekhnika*, Vol. 28, No. 2, pp. 61–75, ISSN 0204-3602.
- 6 **Gneushev, V. A., Stadnik, A. S. and Krohmalnyuk, Yu. A.** (2012), "Logika sooruzheniya i obespecheniya 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.
- 7 **Tyurina, E. A.** (2013), "Innovatsionnye tehnologii pererabotki biomassy v ekologicheskii chistye topliva i elektroenergiyu [Innovative technologies for processing biomass into clean fuel and electricity]", *Vozobnovlyayemaya energetika. Puti povysheniya energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti REENROR-2013: mater. Pervogo Mezhdun. foruma 22-23 October 2013 g.*, pp. 361–363, Ob'edinennyi institut vysokih temperatur RAN, Moscow.
- 8 **Dikalenko, M.** (2013), "V Ukraine massa othodov, dostoynykh nazyvatsya biotoplivom, kak i kotelnykh, dostoynykh ego ispolzovat [In Ukraine, the mass of waste is worthy to be called biofuels, as well as boilers, worthy of its use]", *Ezhednevnyy informatsionnyy daydzhest "TEK I PRESSА"*, available at: <http://uaenergy.com.ua/post/17054/v-ukraine-massa-othodov-dostojnykh-nazyvatsya> (accessed 15 December 2016).
- 9 (2015), "SShA investiryuyut 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-investiryuyut-v-stroitelstvo-10-mini-tets-v-kharkovskoy-obl (accessed 12 December 2016).
- 10 **Tartière Thomas.** (2016), "ORC Market: A World Overview", available at: <http://orc-world-map.org/analysis.html> (accessed 20 December 2016).

- 11 (2016), "Mini-TETS na drevesnoy biomasse. Kombinirovannoe proizvodstvo elektricheskoy i teplovooy energii (kogeneratsiya) [Mini-CHP wood biomass. Combined production of electricity and heat (cogeneration)]", *OOO "VADO inzhenering". Official website of the manufacturer*, available at: <http://www.vadogroup.com/index.php/ru/>, (accessed 12 Desember 2016).
- 12 **Obernbergen, I., Thonhofer, P. and Reisehofer, E.** (2002), "Oberbergen Ingwald Description and evaluation of the new 1,000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Liens, Austria", *Euroheat & Power*, Vol. 10, pp. 41–48.
- 13 **Bazaev, A. R.** (2007), "Issledovanie termodinamicheskikh svoystv smesey tehnikheski vaznykh veschestv kak effektivnykh teplonositeley v energeticheskikh ustanovkakh [The study of thermodynamic properties of mixtures of technically important substances such as effective heat transfer in power plants]", *FIZIKA*, CILD XIII, No. 1–2, pp. 57–60.
- 14 **Bileka, B. i dr.** (2002), "Utilizatsiya sbrosnoy teploty GPA v energoustanovkakh s nizkokipyaschimi rabochimi telami [Disposal relief GPA heat in power plants with low-boiling working bodies]", *Gas turbine technology*, No. 5, pp. 6–10.
- 15 **Redko, A. A.** (2009), "Termodinamicheskie parametry geotermalnoy elektricheskoy stantsii s binarnym sverhkriticheskim tsiklom [The thermodynamic parameters of a geothermal power plant with supercritical binary cycle]", *Integrated technologies and energy saving*, No. 4, pp. 81–85.
- 16 **Pyatnichko, V. A., Krushnevich, T. K. and Pyatnichko, A. I.** (2003), "Utilizatsiya nizkopotentsialnogo tepla dlya proizvodstva elektroenergii s ispolzovaniem pentana v kachestve rabocheho tela [Utilization of low-grade heat to generate electricity using pentane as the working fluid]", *Ecotechnology and resource saving*, No. 4, pp. 3–6.
- 17 **Grinman, M. I. and Fomin, V. A.** (2006), "Perspektivy primeneniya energeticheskikh ustanovok maloy moshnosti s nizkokipyaschimi rabochimi telami [Prospects for the use of energy of low power installations with low boiling point working fluids]", *Power-plant engineering*, No. 1, pp. 63–69.
- 18 **Shubenko, A. L. at al.** (2010), "Ekonomicheskaya effektivnost utilizatsii nizkopotentsialnykh vtorichnykh energeticheskikh resursov posredstvom ustanovki turbiny na nizkokipyaschem rabochem tele [Economic efficiency of utilization of low-grade waste energy by installing a turbine on the low boiling working fluid]", *Energy saving. Energy. Energy audit*, No. 6, pp. 18–26.
- 19 **Grishutin, M. M., Sevastyanov, A. P., Seleznev, L. I. and Fedorovich, E. D.** (1988), *Paroturbinnnye ustanovki s organicheskimi rabochimi telami [Steam turbines installations with organic working fluids]*, Mechanical Engineering, Leningrad, ISBN 5-217-00076-7.
- 20 **Lyhvar, N. V.** (2003), "Gibkie matematicheskie modeli energoustanovok dlya optimizatsii rezhimov TETS [Flexible mathematical models to optimize power plants CHP mode]", *Improving turbines by methods of mathematical and physical modeling*, Vol. 2, pp. 413–419.
- 21 **Lyhvar, N. V., Govoruschenko, Yu. N. and Yakovlev, V. A.** (2003), "Modelirovanie teploenergeticheskikh ustanovok s ispolzovaniem interaktivnoy shemnoy grafiki [Modeling of thermal power plants with the use of interactive graphics circuit]", *Mechanical Engineering Problems*, No. 1, pp. 30–41.
- 22 **Shubenkom A. L., Lyhvarm N. V. and Senetskiym A. V.** (2009), "Ratsionalnoe raspredelenie nagruzok mezhdru turbinami energouzla promyshlennogo predpriyatiya v protsesse ekspluatatsii [Rational distribution of loads between the turbine power unit industrial plant in the operation process]", *Energy saving. Energy. Energy audit*, No. 12(70), pp. 26–34.
- 23 **Andreev, S. Yu. at al.** (2016), "Kogeneratsiya v kotelnnykh na osnove organicheskogo tsikla Renkina [Cogeneration in the boiler plants on the basis of organic Rankine cycle]", *Municipal economy of cities. Series Technical sciences and Architecture*, No. 130, pp. 55–64, ISSN 0869-1231.
- 24 **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).
- 25 (2016), "Tverdoplivnyye kotly s vysokotemperaturnym organicheskim teplonositelem [Solid fuel boilers with high-temperature organic coolant]", *The company "Felix Energy Group" representative in Ukraine of "Leading Specialized Design Bureau for complex equipment for microclimate"*, *Official website of the manufacturer*, available at: http://f-g.com.ua/tverdoplivnyye_kotly_s_vysokotemperaturnym_organicheskim_templonositelem.html (accessed 08 December 2016).
- 26 **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.

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.

Маляренко Виталий Андреевич – доктор технических наук, Харьковский Национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, профессор кафедры электроснабжения городов; ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61002; e-mail: malyarenko@ksame.kharkov.ua.

Malyarenko Vitaliy – Doctor of Technical Sciences, O.M. Beketov National University of Ukraine Economy in Kharkiv, professor of urban electric power supply department, St. Marshal Bazhanov, Kharkov, Ukraine, 61002; e-mail: malyarenko@ksame.kharkov.ua.

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.

Пожадуїста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шубенко, А. Л. Разработка каскадной тепловой схемы турбоустановки на низкикопьящих рабочих телах для сельской энергетикы / **А. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, Н.Ю. Бабак, А.В. Сенецкий, В. П. Сарапин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 13–24. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.02.

Please cite this article as:

Shubenko, O., Malyarenko, V., Babak, M., Senetskyi, 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.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Шубенко, О. Л. Розробка каскадної теплової схеми турбоустановки на низкикопьящих рабочих тілах для сільської енергетикы / **О. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький, В. П. Сарапін** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 13–24. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.02.

АНОТАЦІЯ Запропоновано вдосконалення існуючої теплової схеми малої когенераційної турбоустановки електричною потужністю ~80 кВт шляхом прибудови другого каскаду. Наведено результати розрахункових досліджень з використанням програмного комплексу, розробленого в ППМаш НАН України з оцінки показників потужності та економічності замкнених паротурбінних циклів на низкикопьящих рабочих тілах з урахуванням їх властивостей. Виконано порівняльний аналіз ефективності роботи турбоустановки такого типу на когенераційних і конденсаційних режимах.

Ключові слова: енергозбереження, «біоенергетичне село», низкикопьяще робоче тіло, тепла схема, турбіна, електрична потужність, теплофікаційний і конденсаційний режими, тепло відхідних газів котла.

Поступила (received) 14.02.2017