

cheskogo reaktora [On the problem of optimizing the length of the plasma-chemical reactor core]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2003, vol. 37, no. 3, pp. 309–314.

13. Semenov, V.K., Troshin, S.L. Prognozirovaniye dliny aktivnoy zony kanal'nykh plazmokhimicheskikh reaktorov emkostnogo razryada pri sinteze ozona [On the problem of optimizing the length of the plasma-chemical reactor core]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2002, no. 3, pp. 34–37.

14. Semenov, V.K. Prognozirovaniye dliny aktivnoy zony konversionnykh plazmokhimicheskikh reaktorov [Forecasting the length of the active zone of conversion plasma-chemical reactors]. *Vestnik IGEU*, 2007, issue 4, pp. 39–41.

15. Semenov, V.K., Babikova, L.G. Otsenka effektivnosti sistemy okhlazhdeniya gorizonta'nykh plazmokhimicheskikh reaktorov tselevogo produkta [Evaluation of the efficiency of the cooling system of horizontal plasma-chemical reactors of the target product]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 15–18.

Семенов Владимир Константинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций,

телефон +7 (4932) 38-57-78,

e-mail: semenov_vk@mail.ru

Semenov Vladimir Konstantinovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral Degree), Professor of the Nuclear Power Plants Department,

tel. +7 (4932) 38-57-78,

e-mail: semenov_vk@mail.ru

УДК 662.61

Оценка показателей энергогенерирующей станции с низкокипящим рабочим телом в условиях угольной шахты

А.Б. Бирюков, В.В. Варакута, П.А. Гнитиев, А.С. Приходько
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
E-mail: birukov.tff@gmail.com, varakutaviktor@ukr.net, gnitiev.pavel@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известен ряд научно-технических решений по использованию вторичной и низкопотенциальной теплоты в различных областях хозяйственной деятельности. Одним из перспективных вариантов является использование паротурбинных установок на низкокипящих рабочих телах, которые, несмотря на низкий КПД, получают распространение. Вопросы использования вторичной и низкопотенциальной теплоты при помощи паротурбинных установок на низкокипящих рабочих телах в условиях угольных шахт не решены. В связи с этим актуальной является оценка реальных энергетических характеристик энергогенерирующей станции на низкокипящих рабочих телах в зависимости от изменения внешних факторов.

Материалы и методы: Расчетные оценки эффективности использования вторичной и низкопотенциальной теплоты шахты для электрогенерации при помощи паротурбинных установок на низкокипящих рабочих телах получены при помощи стандартных методов, используемых в технической термодинамике. Для решения поставленной задачи проанализированы и классифицированы по температурным уровням все доступные в условиях угольной шахты источники вторичной и низкопотенциальной теплоты; для определения теплового потока вторичной и низкопотенциальной теплоты каждого вида, утилизация которого возможна при помощи паротурбинных установок на R407c, использованы уравнения теплового баланса и учтен температурный потенциал каждого источника вторичной и низкопотенциальной теплоты; для определения характеристик турбины использована стандартная методика расчета, при этом входными данными являются расход паров низкокипящих рабочих тел, температуры нагревателя и холодильника.

Результаты: Впервые для условий угольной шахты установлены показатели эффективности энергогенерирующей станции на базе одновенцовой конденсационной турбины в зависимости от изменяющихся температур конденсации, определяемых температурой холодильника. Установлено, что в течение года наиболее длительным является промежуток использования станции с наибольшей температурой холодильника 12 °С, при этом тепловой поток вторичной и низкопотенциальной теплоты, который может быть использован в условиях рассмотренной шахты, составляет 80,6 МВт. Для этих наихудших условий КПД генерации составляет 4,7 %, а мощность электрического генератора – 3,79 МВт.

Выводы: Полученные результаты необходимы при проектировании оборудования для использования вторичной и низкопотенциальной теплоты в условиях угольных шахт.

Ключевые слова: вторичная и низкопотенциальная теплота, паротурбинная установка, низкокипящее рабочее тело, энергогенерирующая станция, угольная шахта.

Estimation of performance of low-boiling working medium power-generating station in coal mine conditions

A.B. Biryukov, V.V. Varakuta, P.A. Gnitiev, A.S. Prikhodko
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine
E-mail: birukov.ttf@gmail.com, varakutaviktor@ukr.net, gnitiev.pavel@gmail.com

Abstract

Background: There are a number of technical solutions to the problem of using secondary and low-grade heat (LSH) in different fields of economy. A promising option is the use of steam turbine plants (STP) with low-boiling working mediums (LBM), which, despite their low efficiency, are becoming more and more common. However, the problems of using LSH with STP on LBM in coal mine conditions have not been resolved. Therefore, an urgent problem is to estimate real energy characteristics of the LBM power-generating station depending on changes in external factors.

Materials and methods: The efficiency of using mine LSH for generating electricity by LBM steam turbine plants was calculated by standard methods applied in engineering thermodynamics. To solve the stated problem, we analyzed and classified all LSH sources available in coal mines by temperature levels; to determine LSH of each heat flux type that can be utilized by STP on R407c, we used heat balance equations accounting for the LSH sources temperature potentials; to determine turbine characteristics, we applied a standard calculation procedure, with the LBM vapor flow rate and heater and refrigerator temperatures as the input data.

Results: The authors have, for the first time, calculated the efficiency indicators of a power-generating station based on a single-stage condensation turbine for coal mine conditions depending on varying condensation temperatures determined by the refrigerator temperature. During the year, the longest period of station use was the one when the highest refrigerator temperature equaled 12 °C, and the LSH heat flux that can be utilized under such conditions in the considered mine was 80,6 MW. For these worst conditions, the generation efficiency was 4,7 %, and the electric generator power was 3,79 MW.

Conclusions: The obtained results are necessary for designing equipment utilizing secondary and low-grade heat in coal mine conditions.

Key words: secondary and low-grade heat, steam turbine plant, low-boiling working medium, power-generating station, coal mine.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.012-019

Введение. Известен ряд научно-технических решений по использованию вторичной и низкопотенциальной теплоты (ВНТ) в различных областях хозяйственной деятельности. Одним из перспективных вариантов является использование паротурбинных установок (ПТУ) на низкокипящих рабочих телах (НРТ), которые, несмотря на низкий КПД, получают распространение. В настоящее время вопросы использования ВНТ на угольных шахтах не разработаны в достаточной мере. В ходе повседневной деятельности угледобывающего предприятия с различными теплоносителями сбрасывается огромное количество ВНТ, возможность использования которой в технологическом цикле угледобычи в данное время не реализована. Различная температура источников теплоты, их удаленность друг от друга, как на поверхности, так и в горных выработках, обуславливают необходимость съема и транспортировки энергии ВНТ через промежуточный теплоноситель к интегральному теплообменнику (ИТ), в точку преобразования ее в механическую, а затем в электрическую или высокопотенциальную тепловую энергию с заданными параметрами. При применении для энергогенерации тепломашинной установки (ТМУ) в качестве холодильника могут служить породы на глубине от 30 до 100 м со средней температурой +12 °C и атмосферный воздух при его температуре ниже +12 °C, которому

присущи суточные и сезонные колебания температур, в результате чего температурный напор энергогенерирующей установки постоянно меняется. Кроме того, меняется величина теплового потока источников ВНТ в зависимости от внешних факторов (условий потребления ВНТ в течение годового цикла и сезонной тепловой нагрузки). Поэтому для дальнейшего исследования возможности утилизации, трансформации и возвращения в хозяйственный оборот ВНТ посредством паротурбинной установки с низкокипящим рабочим телом целесообразно рассмотреть пример конкретного угледобывающего предприятия.

Состояние вопроса. Начиная с 2004 г. на шахте им. А.Ф. Засядько (г. Донецк) создавалась самая мощная на постсоветском пространстве когенерационная установка с использованием шахтного метана в качестве топлива [1]. Работы осуществляла компания «Синапс» [2]. Создан когенерационный энергетический комплекс на базе 12 газопоршневых установок типа JMS 620 австрийской фирмы *Jenbacher*, работающих на шахтном метане с концентрацией 25 %. Суммарный КПД этих энергетических установок по теплу и электроэнергии достигает до 86 %, что недостижимо на других энергетических объектах [3]. Установленная электрическая мощность одной установки составляет 3,035 МВт, а тепловая – 2,63 Гкал/ч. Основной продукцией энергоком-

плекса на данной шахте является электроэнергия, вырабатываемая газопоршневыми установками, размещенными в специальном здании. Выработанная электроэнергия за годовой цикл составляет 122,046 МВт·ч. Одновременно энергокомплекс вырабатывает через систему охлаждения газопоршневой установки тепловую энергию той же мощности (3050 кВт), что и электрическая, с температурным графиком 110/70 °С [4]. Утилизация подобного количества тепла (36 МВт), равно как и теплоты уходящих дымовых газов, является актуальной задачей. Базовый вариант использования тепла, вырабатываемого газопоршневой установкой, предусматривает подачу его в систему горячего водоснабжения. В летнее время года, в связи со снижением потребности предприятий в горячей воде, избытки тепла отводятся в окружающую среду [5].

В последние годы разработаны технологии, которые позволяют утилизировать и энергетически эффективно использовать метан с очень низкой концентрацией в вентиляционном воздухе шахт путем термического окисления на катализаторах [6]. Некоторые из этих технологий могут комбинироваться с системами рекуперации тепла, предназначенными для использования на шахтах для централизованного теплоснабжения или в паровых турбинах, генерирующих электроэнергию. На нескольких предприятиях мира (в Австралии, США, Китае) в целях борьбы с вредными выбросами в демонстрационных и коммерческих масштабах внедрены технологии сжигания вентиляционного метана для производства электрической и тепловой энергии. Крупнейший проект реализован в Китае в 2010 г. с применением шести установок *VOCSIDIZER* (разработчик *MEGTEC Systems*) с обработкой вентиляционного метана расходом 235000 $\text{м}^3/\text{ч}$ (3916 $\text{м}^3/\text{мин}$). Значимые результаты в технологии *VAM* достигнуты в Австралии. На практике реализована технология получения электричества из исходящей вентиляционной струи в результате сжигания низкоконцентрированного метана в каталитических горелках. Доказано, что вентиляционная струя угольной шахты расходом 255000 $\text{м}^3/\text{ч}$ может дать приблизительно 5 МВт электричества. Австралийский проект *WestVAMP* преобразовывает в тепло и электричество приблизительно одну пятую часть вентиляционной струи. Доказано, что энергосистемы *VOCSIDIZER* могут работать с низкими концентрациями метана (даже 0,1 %) без дополнительных затрат энергии. Эффективность использования энергии (тепло и электричество) энергосистемы составляет при этом приблизительно 98 %. Отсутствие пиков температуры в зоне окисления исключает появление оксидов азота. Показано, что энергия струи расходом 800 000 $\text{м}^3/\text{ч}$ с концентрацией метана 1 % может генерировать 72 МВт тепловой энергии [6].

Проблемой известных технических решений по использованию шахтного метана является то, что объемы потребления теплоты системами теплоснабжения шахтных комплексов существенно меняются в течение года, а объемы производства теплоты практически постоянны.

В некоторой мере задачи такого рода решаются в рамках ТЭЦ, на которых повышение эффективности работы тепловой схемы достигается за счет использования дополнительного замкнутого контура с НРТ. Способ усовершенствования тепловой схемы – реализация второго каскада параллельно сетевой установке. В качестве НРТ второго каскада выбран фреон, который наиболее подходит по термодинамическим и экологическим показателям. Проведенные предварительные расчетные исследования показали, что за счет применения второго каскада электрическая мощность установки увеличивается почти вдвое [7].

Вопросы использования ТМУ на НРТ для эффективного использования ВНТ в рамках шахтных комплексов до настоящего времени не ставились. В связи с этим актуальной является оценка показателей работы энергогенерирующей станции на НРТ как потребителя ВНТ в условиях угольной шахты, имеющей в своем составе когенерационную установку, в зависимости от изменения внешних факторов.

Методы исследования. Исходя из анализа, проведенного в [8], в качестве ТМУ рассмотрена схема на основе ПТУ с хладагентом R407c в качестве НРТ с изменяемыми параметрами. Схему подвода теплоты к интегральному теплообменнику – испарителю ПТУ примем параллельную с отдельным контуром от каждого источника ВНТ, но с последовательным нагревом НРТ (рис. 1). Ввиду малого предполагаемого теплоперепада принимаем одно-вечную, с одной ступенью скорости, конденсационную, осевую турбину. Для удобства сравнения эффективности различных температурных режимов работы энергогенерирующей станции основным критерием будем считать количество удельной энергии W_k (кВт·ч) на муфте электрогенератора за годовой цикл.

Для теплового расчета проточной части ПТУ с НРТ и реальных энергетических характеристик ТМУ в качестве потребителя ВНТ необходимо:

- 1) установить источники ВНТ и определить их оценочные количественные характеристики;
- 2) оценить температуру нагревателя T_r , определяющую температуру НРТ в испарителе, и в зависимости от суточных и сезонных колебаний температур атмосферного воздуха определить температуру холодильника T_x , при которой утилизируется наибольшее количество ВНТ за годовой цикл;

3) определить используемый тепловой поток ВНТ $Q_{\text{ВНТ}}$ в зависимости от внешних факторов (условий потребления ВНТ в течение годового цикла).

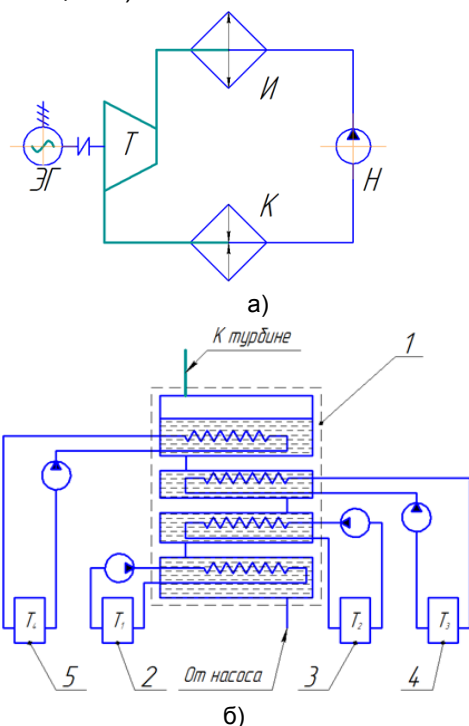


Схема ТМУ и подвода теплоты: а – принципиальная схема ТМУ; б – схема подвода тепла в испаритель; 1 – интегральный теплообменник; 2 – воздушно-водяной теплообменник рудничного воздуха (T_1); 3 – водо-водяной теплообменник главного водоотлива (T_2); 4 – водо-водяной теплообменник утилизации метана (T_4); 5 – котлы системы утилизации угольной пыли (T_3)

Результаты исследования. Источники ВНТ. Более 95 % ВНТ в условиях угольных шахт генерируют такие источники, как дегазационный и каптируемый метан, угольная пыль, шахтные воды и отработанный рудничный воздух. Оценка запасов этих источников проведена для условий шахты им. А.Ф. Засядько на основании характеристик, представленных в интернет ресурсах:

- максимальная добыча угля – 2,031 млн т/год;
- максимальная глубина горных работ – 1400 м;
- температура горного массива – +49 °С;
- газоносность угольных пластов шахты – от 19 до 23 м³/т;
- общее количество воздуха, подаваемого в шахту, – 40 тыс. м³/мин;
- общий приток воды в действующие горные выработки – 600–650 м³/ч [1].

Источники ВНТ шахты можно разделить на две группы: 1) величина которых не меняется за годовой цикл работы шахты, так как они зависят только от угледобычи; 2) величина которых изменяется в зависимости от внешних

факторов. К последним относится дегазационный метан, используемый для работы шахтной ТЭЦ, пиковая теплогенерация которой составляет 36 МВт. Исходя из графика сезонной тепловой нагрузки, в период с апреля по октябрь получаемое вторичное тепло используется на 30 %, избыток сбрасывается в атмосферу. В отопительный период тепловая нагрузка зависит от температуры атмосферного воздуха. Для работы ТМУ может быть использован тепловой поток $Q_1 = 36 \cdot 0,7 = 25,2$ МВт в весенне-осенний период и $Q_1 = 36(1-k)$ в отопительный период, где $k = 0,6-1$ – отношение тепловой нагрузки к пиковой теплогенерации.

При угледобыче до 3 % угля превращается в пыль (30 кг на 1 т добытого угля), которая может быть использована для получения вторичного тепла в водогрейных и паровых котлах с пылеугольными горелками или горелками на водоугольной смеси. Для угля марки Ж и КЖ (добываемого на шахте им. А.Ф. Засядько) низшая теплота сгорания может быть принята $Q_H^p = 23,65$ МДж/кг, тогда ВНТ от утилизации пыли составит:

$$W_{\text{уп}} = 30 \cdot 23,65 \cdot 0,85 = 603,08 \text{ МДж/т} = 167,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$$

Условно принимаем, что тонна угля на шахте добывается в течение 15,5 с и этот показатель остается неизменным в течение всего годового цикла. Тогда $Q_2 = 38,9$ МВт.

Для соблюдения технологического процесса и правил безопасности при добыче угля необходимо интенсивное проветривание горных выработок. На каждую тонну добытого угля требуется 12,2 т свежего воздуха. Температура рудничного воздуха не должна превышать +26 °С, его средняя плотность составляет 1,18 кг/м³, т.е. на каждую добытую тонну система вентиляции шахты обеспечивает 10333 м³ свежего воздуха. Количество ВНТ, Дж, которое может быть извлечено в этом случае, будет равно

$$W_{\text{рв}} = c_{\text{воз}} m_{\text{воз}} \Delta T_{\text{воз}},$$

где $c_{\text{воз}} = 1000$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воздуха; $m_{\text{воз}} = 12200$ кг – масса воздуха; $\Delta T_{\text{воз}} = T_{1\text{воз}} - T_{2\text{воз}}$ – перепад температур воздуха на входе и выходе предлагаемого воздушно-фреонового теплообменника, °С, в условиях шахты им. А.Ф. Засядько, когда температура холодильника составляет +12 °С (наихудший режим); $T_{1\text{воз}} = 26$ °С – температура отработанного рудничного воздуха на входе в теплообменник; $T_{2\text{воз}} = 22$ °С – температура отработанного рудничного воздуха на выходе из теплообменника.

$$\text{Тогда} \\ W_{\text{рв}} = 1000 \cdot 12200 \cdot (26 - 22) = 48,8 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 13,56 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т, или } Q_3 = 3,16 \text{ МВт.}$$

При притоке воды в действующие горные выработки, составляющем 600–650 м³/ч, количество ВНТ, Дж, которое может быть извлечено, составит

$$W_{\text{вод}} = c m_{\text{во}} \Delta T_{\text{во}},$$

где $c = 4187$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость воды; $m_{\text{во}} = \frac{650 \cdot 1000 \cdot 24 \cdot 365}{2031000} = 2803,5$ кг –

количество откачиваемой воды, приведенное к 1 т добытого угля; $\Delta T_{\text{во}}$ – перепад температур откачиваемой воды на входе и выходе водоводяного теплообменника, °С,

$$\Delta T = T_1 - T_2,$$

где $T_1 = 49^\circ\text{C}$ – температура откачиваемой воды на водосборнике низшего горизонта; $T_2 = 25^\circ\text{C}$ – принимаем не ниже температуры теплоносителя, подводимого от ИТ:

$$\Delta T = 49 - 25 = 24^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$W_{\text{вод}} = 4187 \cdot 2803,5 \cdot 24 = 2,8 \cdot 10^8 \text{ Дж/т} = 78,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т},$$

или $Q_4 = 18,2$ МВт.

Данные об источниках ВНТ шахты им. А.Ф. Засядько сводим в табл. 1.

Определение температуры нагревателя и холодильника в режиме с максимальным потреблением ВНТ. Для выбора режима работы с температурой холодильника, при которой утилизируется наибольшее количество ВНТ за годовой цикл, необходимо определить:

- 1) температуру нагревателя T_r ;
- 2) ориентировочный удельный расход пара на турбину в каждом режиме;
- 3) удельный тепловой поток ВНТ, необходимый для обеспечения данного расхода пара;
- 4) предварительный КПД ТМУ;
- 5) эффективную удельную работу на муфте электрогенератора;
- 6) удельную энергию на муфте электрогенератора за годовой цикл.

Анализ имеющихся в [9] диаграммы и таблиц состояния выбранного для исследования НРТ показывает, что наименьшие энергозатраты на испарение будут в точке с критическими параметрами. Однако при этом резко падает энтальпия пара. Поэтому температуру промежуточного теплоносителя на выходе из испарителя (последней секции ИТ) принимаем $T_r = 55^\circ\text{C}$. Температуры холодильника T_x для каждого режима берем из [8].

Температура пара, °С, перед турбиной рассчитывается как

$$T'_r = T_r - 5.$$

Из [9] определяем давление пара перед турбиной:

$$p'_0 = 2,2 \text{ МПа}.$$

Тогда давление пара перед соплами составит

$$p_0 = 0,95 \cdot p'_0 = 0,95 \cdot 2,2 = 2,09 \text{ МПа};$$

а температура пара за турбиной

$$T'_x = T_x + 5, ^\circ\text{C}.$$

Из [9] определяем давление пара за турбиной p'_k , МПа.

Падение давления в выходной коробке и выхлопном патрубке турбины составляет, МПа,

$$\Delta p = p'_k \lambda \left(\frac{c_{\text{вп}}}{100} \right)^2,$$

где λ – коэффициент сопротивления выхлопного патрубка (принимаем 0,06); $c_{\text{вп}}$ – скорость пара в выходном сечении выхлопного патрубка турбины (для конденсационной турбины принимаем 110 м/с).

Давление за рабочими лопатками венца рабочего колеса равно, МПа,

$$p_k = p'_k + \Delta p.$$

По h, s -диаграмме и таблицам из [9] определяем энтальпию пара при давлении p_0 , p'_k и p_k . Тогда располагаемый тепलोперепад идеальной турбины составит, кДж/кг,

$$H_{\text{оид}}^T = h_0 - h'_{\text{кт}}.$$

Располагаемый (перерабатываемый) тепलोперепад ступени, кДж/кг,

$$H_0^T = h_0 - h_{\text{кт}}.$$

Относительный эффективный КПД турбины рассчитывается как

$$\eta_{\text{ое}} = \eta_{\text{др}} \eta'_{\text{oi}} \eta_{\text{ввр}} \eta_{\text{тм}},$$

где $\eta_{\text{др}} = \frac{H_0^T}{H_{\text{оид}}^T}$; η'_{oi} – внутренний относительный

КПД (принимаем 0,75); $\eta_{\text{тм}}$ – механический КПД турбины (принимаем 0,98); $\eta_{\text{ввр}}$ – коэффициент выхода внутренней работы (при отсутствии отборов пара из турбины принимаем равным 1).

Таблица 1. Результаты оценки запасов различных источников ВНТ и их температурных потенциалов

Наименование источника	Способ получения теплоты	Удельные запасы теплоты W , кВт·ч/т	Мощность теплового потока Q , МВт	Температура источника, °С
Дегазационный метан	Сжигание в газопоршневых установках типа JMS 620	0 – 108,5	0 – 25,2	110
Угольная пыль	Сжигание в котлах с пылеугольными горелками и горелками на водоугольной смеси	167,5	38,9	110
Шахтные воды	Природный геотермальный и техногенный характер	78,3	18,2	49
Отработанный рудничный воздух	Техногенный характер	13,56	3,16	26

Ориентировочный удельный расход пара на турбину составит, кг/с,

$$G_{уд} = \frac{N_T}{H_{0ид}^T \eta_{ое}}$$

Удельный тепловой поток ВНТ необходимый для обеспечения удельного расхода пара в данном режиме, определяется по формуле, кВт,

$$Q_{ВНТ\ уд} = c G_{уд} ((T_r - 5) - (T_x + 5)) + r G_{уд},$$

где c – удельная теплоемкость жидкой фазы рабочего тела, равная 1,6 кДж/(кг·К); r – удельная теплота парообразования рабочего тела, равная 149,1 кДж/кг.

Предварительный КПД на муфте электрогенератора определяется по формуле

$$\eta_{тму} = \frac{N_{тму}}{Q_{ВНТ\ уд}}$$

Эффективная удельная работа турбины в данном режиме равна, кДж,

$$L_T = \frac{N_T}{G_{уд}}$$

Удельная энергия на муфте электрогенератора за годовой цикл составляет, кВт·ч,

$$W_k = L_T n \tau,$$

где n – число часов работы в данном режиме T_x за годовой цикл; $\tau = 3$ ч – время между измерениями T_x .

Результаты расчета сводим в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики работы ПТУ на НРТ в течение года

T_r , К	p'_k , МПа	p_k , МПа	Δp , МПа	$H_{0ид}^T$, кДж/кг	H_0^T , кДж/кг	$\eta_{др}$	$\eta_{ое}$	$G_{уд}$, кг/с	$Q_{ВНТ\ уд}$, кВт	$\eta_{тму}$	L_T , кДж	n , ч	W_k , кВт·ч
285	0,953	1,013	0,05997	7	6,252	0,8931	0,6565	0,2176	42,196	0,024	4,595	4308	19796,2
284	0,927	0,985	0,05833	7,36	6,529	0,8871	0,652	0,2084	40,739	0,025	4,799	219	1050,9
283	0,9	0,957	0,05664	7,72	6,95	0,9003	0,6617	0,1958	38,585	0,026	5,108	141	720,3
282	0,874	0,929	0,055	6,32	7,33	1,1598	0,8525	0,1856	36,881	0,027	5,388	243	1309,2
281	0,849	0,902	0,05343	8,48	7,68	0,9057	0,6657	0,1772	35,484	0,028	5,645	252	1422,5
280	0,824	0,876	0,05185	8,87	8,08	0,9109	0,6695	0,1684	33,997	0,029	5,939	264	1567,8
279	0,8	0,85	0,05034	9,26	8,46	0,9136	0,6715	0,1608	32,727	0,031	6,218	345	2145,2
278	0,777	0,826	0,0489	9,66	8,84	0,9151	0,6726	0,1539	31,566	0,032	6,497	357	2319,6
277	0,753	0,8	0,04739	9,98	9,26	0,9279	0,682	0,1469	30,37	0,033	6,806	339	2307,3
276	0,731	0,777	0,046	10,43	9,61	0,9214	0,6772	0,1416	29,49	0,034	7,063	402	2839,5
275	0,709	0,754	0,04462	11,02	10,3	0,9347	0,687	0,1321	27,726	0,036	7,571	357	2702,7
274	0,687	0,73	0,04323	11,29	10,48	0,9283	0,6823	0,1298	27,458	0,036	7,703	285	2195,3
273	0,666	0,708	0,04191	11,71	10,89	0,93	0,6835	0,1249	26,624	0,038	8,004	231	1849,0
272	0,646	0,687	0,04065	12,14	11,3	0,9308	0,6841	0,1204	25,85	0,039	8,306	219	1818,9
271	0,626	0,665	0,03939	12,57	11,74	0,934	0,6865	0,1159	25,067	0,04	8,629	210	1812,1
270	0,606	0,644	0,03813	13,01	12,17	0,9354	0,6875	0,1118	24,36	0,041	8,945	135	1207,6
269	0,587	0,624	0,03694	13,54	12,66	0,935	0,6872	0,1075	23,589	0,042	9,305	66	614,1
268	0,568	0,604	0,03574	13,9	13,05	0,9388	0,6901	0,1043	23,051	0,043	9,592	48	460,4
267	0,55	0,585	0,03461	14,34	13,5	0,9414	0,6919	0,1008	22,444	0,045	9,923	24	238,1
266	0,532	0,565	0,03348	14,81	13,86	0,9359	0,6879	0,0982	22,018	0,045	10,19	6	61,1
265	0,515	0,547	0,03241	15,26	14,34	0,9397	0,6907	0,0949	21,433	0,047	10,54	42	442,7
264	0,498	0,529	0,03134	15,72	14,89	0,9472	0,6962	0,0914	20,787	0,048	10,94	18	197,0
263	0,481	0,511	0,03027	16,19	15,36	0,9487	0,6973	0,0886	20,293	0,049	11,29	39	440,3
262	0,465	0,494	0,02926	16,66	15,82	0,9496	0,6979	0,086	19,841	0,05	11,63	21	244,2
261	0,449	0,477	0,02825	16,94	16,31	0,9628	0,7077	0,0834	19,378	0,052	11,99	33	395,6
260	0,434	0,461	0,02731	17,46	16,79	0,9616	0,7068	0,081	18,954	0,053	12,34	33	407,2
259	0,419	0,445	0,02637	18,08	17,27	0,9552	0,7021	0,0788	18,553	0,054	12,69	30	380,8
258	0,405	0,43	0,02549	18,58	17,73	0,9543	0,7014	0,0767	18,194	0,055	13,03	33	430,0
257	0,391	0,416	0,02461	19,07	18,19	0,9539	0,7011	0,0748	17,854	0,056	13,37	24	320,9
256	0,377	0,401	0,02372	19,55	18,71	0,957	0,7034	0,0727	17,474	0,057	13,75	15	206,3
255	0,364	0,387	0,02291	20,05	19,19	0,9571	0,7035	0,0709	17,15	0,058	14,1	12	169,3
254	0,351	0,373	0,02209	20,55	19,7	0,9586	0,7046	0,0691	16,817	0,059	14,48	12	173,8
253	0,338	0,359	0,02127	21,06	20,26	0,962	0,7071	0,0672	16,459	0,061	14,89	6	89,3
252	0,326	0,347	0,02051	21,56	20,7	0,9601	0,7057	0,0657	16,215	0,062	15,21	6	91,3
251	0,314	0,334	0,01976	22,07	21,22	0,9615	0,7067	0,0641	15,92	0,063	15,6	3	46,8
250	0,302	0,321	0,019	22,57	21,76	0,9641	0,7086	0,0625	15,625	0,064	15,99	6	96,0

Определение используемого теплового потока ВНТ шахты. В соответствии с выбранной схемой подвода тепла к интегральному теплообменнику от источников и данными табл. 1 определяем величину расходов НРТ ПТУ по каждому источнику, кг/с, в режиме с наибольшим потреблением ВНТ (когда температура холодильника составляет +12 °С):

$$G_{1,2} = \frac{Q_1 + Q_2}{c_{1,2}(T_{r1,2} - T_{r3}) + r};$$

$$G_3 = \frac{Q_3}{c_3(T_{r3} - T_{r4})};$$

$$G_4 = \frac{Q_4}{c_4(T_{r4} - T_{x4})},$$

где $T_{r1,2} = T'_r = 50$ °С – температура НРТ перед турбиной; $T_{r3} = T_{из} - 5 = 49 - 5 = 44$ °С – температура НРТ на входе в испаритель; $c_{1,2} = 1722$ Дж/(кг·К) – теплоемкость НРТ при T_{r3} ; $r = 149100$ Дж/кг – скрытая теплота парообразования НРТ при $T_{r1,2}$; $T_{r4} = T_{и4} - 5 = 26 - 5 = 21$ °С – температура НРТ на входе в секцию теплообменника водоотлива; $c_3 = 1517$ Дж/(кг·К) – теплоемкость НРТ при T_{r4} ; $T_{x4} = T_x + 5 = 12 + 5 = 17$ °С – температура НРТ на выходе из конденсатора ПТУ; $c_4 = 1488$ Дж/(кг·К) – теплоемкость НРТ при T_{x4} .

Тогда

$$G_{1,2} = \frac{(25,2 + 38,9) \cdot 10^6}{1722 \cdot (50 - 44) + 14,91 \cdot 10^4} = 402,05 \text{ кг/с};$$

$$G_3 = \frac{18,2 \cdot 10^6}{1517(44 - 21)} = 521,6 \text{ кг/с};$$

$$G_4 = \frac{3,16 \cdot 10^6}{1488 \cdot (21 - 17)} = 530,91 \text{ кг/с}.$$

К дальнейшему расчету принимаем наименьшее значение расхода НРТ:

$$G = G_{1,2} = 402,05 \text{ кг/с}.$$

Уточняем величины тепловых потоков ВНТ, используемых в теплообменниках ИТ секций водоотлива и рудничного воздуха:

$$Q_3 = c_3 G (T_{r3} - T_{r4}) = 1517 \cdot 402,05 \cdot (44 - 21) = 14,03 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 14,03 \text{ МВт};$$

$$Q_4 = c_4 G (T_{r4} - T_{x4}) = 1488 \cdot 404,7 \cdot (21 - 17) = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 2,4 \text{ МВт};$$

Тогда величина суммарного теплового потока ВНТ, используемого в данном режиме, составит

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 25,2 + 38,9 + 14,03 + 2,4 = 80,53 \text{ МВт}.$$

Выводы. Источниками ВНТ в условиях угольных шахт являются отработанный рудничный воздух, теплота шахтных вод, угольная пыль и дегазационный метан.

В результате анализа значений температур нагревателя и холодильника в течение года установлено, что наибольшее количество ВНТ за годовой цикл используется, когда температура холодильника составляет +12 °С (285 К), а

температурный напор между источником с максимальной температурой (110 °С), подводящим энергию ВНТ к испарителю ПТУ, и конденсатором ПТУ составляет 98 °С, ввиду наибольшей длительности этого режима. Поэтому определение геометрии проточной части турбины в дальнейшем необходимо выполнять именно для этого значения температуры холодильника.

В результате анализа изменений основных характеристик работы ПТУ в течение года с учетом изменения внешних условий установлено, что суммарный тепловой поток первичной энергии ВНТ, который может быть использован и частично возвращен в хозяйственный оборот шахты, составляет при работе в наиболее характерном режиме 80,6 МВт. При этом имеем КПД производства электроэнергии 4,7 % и мощность, выдаваемую электрическим генератором, 3,79 МВт.

Список литературы

1. **Федоров С.Д., Облакевич С.В., Радюк О.П.** Проблема утилизации шахтного метана в когенерационных установках и пути ее решения на примере шахты им. А.Ф. Засядько // Промэлектр. – 2006. – № 5. – С. 41–45.
2. **Федоров С.Д.** Процессы комбинированной выработки электро- и теплоэнергии и их реализация в проектах НПП «Синапс» // Энерговести. – 2004. – № 2. – С. 5–6.
3. **Гурьянов В.В.** Состояние газобезопасности и направления работ по совершенствованию дегазации и утилизации шахтного метана на Украине // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – № 8. – С. 184–187.
4. **Коровяка Е.А., Манукян Э.С., Василенко Е.А.** Перспективы извлечения шахтного метана и его утилизация в условиях шахты «Западно-донбасская» ОАО «Павлоградуголь» // Научный вестник НГУ. – 2011. – № 4. – С. 39–44.
5. **Yefremov I.A., Podkopaev S.V., Moroz O.K.** Направления энергообеспечения и экологической безопасности промышленных горнодобывающих регионов путем создания теплоэнергетических комплексов // Management Systems in Production Engineering. – 2014. – No. 2(14). – P. 81–85.
6. **Круть Б.А., Рак А.Н., Мирошниченко Н.Н.** Перспективные направления утилизации метана угольных шахт // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сб. науч. работ XV науч.-техн. конф. асп. и студ. в г. Донецке, 25–26 мая 2016 г. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 341 с.
7. **Реализация каскадных тепловых схем с применением турбин на низкикипящих рабочих телах / А.Л. Шубенко, А.В. Русанов, А.В. Сенецкий, Р.А. Русанов // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 12. – С. 24–29.**
8. **Бирюков А.Б., Варакута В.В., Гнитиев П.А.** Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 2. – С. 12–20. doi: 10.17588/2072-2672.2018.2.012-020.
9. **Bell Ian H., Wronski.** Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the

Open-Source Thermophysical Property Library Cool-Prop. Standard Reference Data Program. 2014 [http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R1234ze\(Z\).htm](http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R1234ze(Z).htm)

References

1. Fedorov, S.D., Oblakevich, S.V., Radyuk, O.P. Problema utilizatsii shakhtnogo metana v kogeneratsionnykh ustanovkakh i puti ee resheniya na primere shakhty im. A.F. Zasyad'ko [Problem of utilizing coalmine methane in cogeneration plants and its solutions at the A.F. Zasyadko coalmine as an example]. *Promelektro*, 2006, no. 5, pp. 41–45.
2. Fedorov, S.D. Protsessy kombinirovannoy vyrobotki elektro- i teploenergii i ikh realizatsiya v proektakh NPP «Sinaps» [Processes of combined generation of electric and heat power and their implementation in SINAPSE company projects]. *Energovesti*, 2004, no. 2, pp. 5–6.
3. Gur'yanov, V.V. Sostoyanie gazobezopasnosti i napravleniya rabot po sovershenstvovaniyu degazatsii i utilizatsii shakhtnogo metana na Ukraine [Gas safety and directions of improving methods of degassing and coalmine methane utilization in Ukraine]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2004, no. 8, pp. 184–187.
4. Korovyaka, E.A., Manukyan, E.S., Vasilenko, E.A. Perspektivy izvlecheniya shakhtnogo metana i ego utilizatsiya v usloviyakh shakhty «Zapadno-donbasskaya» ОАО «Pavlogradugol'» [Prospects for coalmine methane recovery and utilization in conditions of the «Zapadno-Donbasskaya» coal mine of ОАО «Pavlogradugol'»]. *Nauchnyy vestnik NGU*, 2011, no. 4, pp. 39–44.
5. Yefremov, I.A., Podkopaev, S.V., Moroz, O.K. Napravleniya energoobespecheniya i ekologicheskoy bezopasnosti promyshlennykh gornodobyvayushchikh regionov putem sozdaniya teploenergeticheskikh kompleksov [Provision of energy supply and environmental safety of industrial coal-mining regions by creating heat power complexes]. *Management Systems in Production Engineering*, 2014, no. 2(14), pp. 81–85.
6. Krut', B.A., Rak, A.N., Miroshnichenko, N.N. Perspektivnye napravleniya utilizatsii metana ugol'nykh shakht [Promising directions of coalmine methane utilization]. *Sbornik nauchnykh rabot XV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii aspirantov i studentov «Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh ob'ektov i protsessov. Poisk molodykh»* [Collection of scientific papers of the XV scientific and technical conference of post-graduate students and students «Automation of technological facilities and processes»]. Donetsk: DonNTU, 2016. 341 p.
7. Shubenko, A.L., Rusanov, A.V., Senetskiy, A.V., Rusanov, R.A. Realizatsiya kaskadnykh teplovykh skhem s primeneniem turbin na nizkokipyashchikh rabochikh telakh [Implementation of heat cascade diagrams by using low-boiling working medium turbines]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPi»: sbornik nauchnykh trudov* [Vestnik of the National Technical University «KhPI»: a collection of scientific papers]. Khar'kov: NTU «KHPi», 2013, no. 12, pp. 24–29.
8. Biryukov, A.B., Varakuta, V.V., Gnitiev, P.A. Otsenka effektivnosti energogeneriruyushchey stantsii, utiliziruyushchey vtorichnyuyu i nizkopotentsial'nuyu teplotu v usloviyakh ugol'nykh shakht, metodom termodinamicheskogo analiza [Estimation of the efficiency of the power-generating plant utilizing secondary and low-grade heat in coal mine conditions by the thermodynamic analysis method]. *Vestnik IGEU*, 2018, no. 2, pp. 12–20. doi: 10.17588/2072-2672.2018.2.012-020.
9. Bell, Ian H., Wronski, J. Pure and Psedopure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library Cool-Prop. Standard Reference Data Program. 2014 [http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R1234ze\(Z\).htm](http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R1234ze(Z).htm)

Бирюков Алексей Борисович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической теплофизики,

адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а, телефон +38 (050)-260-97-75, e-mail: birukov.tff@gmail.com

Biryukov Aleksei Borisovich,

Donetsk National Technical University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Head of the Engineering Thermophysics Department,

address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a, tel. +38 (050)-260-97-75, e-mail: birukov.tff@gmail.com

Варакута Виктор Владимирович,

ГП НИИВЭ,

научный сотрудник, аспирант,

телефоны +38 (066)-402-27-72, e-mail: varakutaviktor@ukr.net

Varakuta Viktor Vladimirovich,

GP «NIIVE»,

Research worker, Post-graduate student,

tel. +38 (066)-402-27-72, e-mail: varakutaviktor@ukr.net

Гнитиев Павел Александрович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,

кандидат технических наук, доцент кафедры технической теплофизики,

адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а, телефон +38 (066) 671-34-71, e-mail: gnitiev.pavel@gmail.com

Gnitiev Pavel Aleksandrovich,

Donetsk National Technical University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Engineering Thermophysics Department,

address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a, tel. +38 (066) 671-34-71, e-mail: gnitiev.pavel@gmail.com

Приходько Анна Сергеевна,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,

студент,

адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а, телефон +38 (095) 028-64-18, e-mail: anyuta.prihodko.1998@mail.ru

Prihodko Anna Sergeevna,

Donetsk National Technical University,

Student, address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a, tel. +38 (095) 028-64-18, e-mail: anyuta.prihodko.1998@mail.ru