

УДК 62-93

Назар Викторovich Колесниченко

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Украина, Донецк, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Сергей Матвеевич Сафьянц

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», доктор технических наук, профессор, декан факультета металлургии и теплоэнергетики, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Украина, Донецк, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Алексей Борисович Бирюков

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, Украина, Донецк, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Олег Виталиевич Литвинов

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», студент, Украина, Донецк, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Обоснование целесообразности использования бака-аккумулятора для регулирования отопительной нагрузки газопоршневой мини-ТЭЦ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Использование бака-аккумулятора для регулирования нагрузок мини-ТЭЦ позволяет улучшить технико-экономические показатели ее работы. Однако результаты исследований использования бака-аккумулятора в системах отопления, в отличие от систем горячего водоснабжения, в литературе представлены недостаточно. Целью исследования является определение условий и показателей, при которых использование бака-аккумулятора для регулирования отопительной нагрузки мини-ТЭЦ будет экономически целесообразным.

Материалы и методы. Исследование тепловой схемы строится на решении стандартных балансовых уравнений теплового баланса и теплопередачи. Моделирование теплопередачи в тепловом утилизационном контуре когенерационной установки ведется путем аппроксимации паспортных характеристик оборудования в диапазоне рабочих нагрузок от 50 до 100 %. Моделирование времени стояния температур наружного воздуха проводится в соответствии с методикой Б.Л. Шифринсона и В.Я. Хасилева. Условия проведения численного исследования являются достаточно характерными для тепловой сети г. Донецка.

Результаты. Впервые для условий проведения численного исследования установлена зависимость располагаемой и используемой тепловой емкости бака-аккумулятора от температуры наружного воздуха при различных значениях проектного объема бака. Исследованы количественные характеристики влияния проектного объема бака-аккумулятора на производство электроэнергии в часы пиковых, полупиковых и минимальных нагрузок энергосистемы. Достоверность полученных результатов определена корректным использованием апробированных методик расчета параметров работы системы водяного отопления, тепловых аппаратов.

Выводы. Использование бака-аккумулятора для регулирования отопительной нагрузки мини-ТЭЦ является технически реализуемым и экономически целесообразным. При проектном объеме бака-аккумулятора в диапазоне 65–126 м³ на 1МВт подключенной отопительной нагрузки простой срок окупаемости мини-ТЭЦ изменяется в незначительных пределах и может считаться приемлемым. Наличие бака-аккумулятора позволяет реализовывать маневренные возможности когенерационных установок, сохраняя при этом высокую долю производства энергии в комбинированном режиме. Коэффициент теплофикации, равный единице, позволяет достигнуть высокой эффективности использования топлива для производства как электрической, так и тепловой энергии. Результаты исследования могут быть использованы в системах коммунального теплоснабжения при внедрении газопоршневых когенерационных установок.

Ключевые слова: бак-аккумулятор, регулирование нагрузок, когенерация, располагаемая тепловая емкость, используемая тепловая емкость, отопительная нагрузка

Nazar Viktorovich Kolesnichenko

Donetsk National Technical University, Senior Lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Ukraine, Donetsk, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Sergey Matveevich Safiants

Donetsk National Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Dean of the Faculty of Metallurgy and Heat Power Engineering, Head of Industrial Heat Power Engineering Department, Ukraine, Donetsk, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Aleksei Borisovich Biryukov

Donetsk National Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor, Head of Engineering Thermophysics Department, Ukraine, Donetsk, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Oleg Vitalievich Litvinov

Donetsk National Technical University, Student, Ukraine, Donetsk, e-mail: kafedra-pt@donntu.org

Research of functionality of using a storage tank for regulating heating load of a gas piston mini-CHPP

Abstract

Background. The use of a storage tank to regulate the loads of the mini-CHP plant improves the technical and economic indicators of its operation. However, the results of studies of the use of a storage tank in heating systems, in contrast to hot water supply systems, are poorly represented. The purpose of the study is to determine the conditions and indicators under which the use of a storage tank to regulate the heating load of a mini-CHPP is economically viable.

Materials and methods. The study of the heat grid is based on solving the standard heat balance and heat transfer equations. Modeling of heat transfer in the heat recovery circuit of a cogeneration unit is carried out by approximating the passport specification of the equipment in the range of operating loads from 50 to 100 %. Modeling the standing time of the outside air temperatures is carried out in accordance with the method of B. Shifrinson and V.Ya. Khasilev. The conditions of the numerical study are quite typical for the heating network of Donetsk.

Results. For the first time, to satisfy the conditions of a numerical study, the dependence of the available and used thermal capacity of the storage tank on the outside air temperature has been established for different values of the design volume of the tank. The quantitative characteristics of the influence of the design volume of the storage tank on electricity generation during peak, half-peak and minimum power system loads are investigated. The reliability of the results obtained is determined by the correct use of proven methods for calculating the operation parameters of water heating system and heat devices.

Conclusions. The study shows that the use of a storage tank to regulate the heating load of a mini-CHPP is technically and economically feasible. With the design volume of the storage tank in the range of 65–126 m³ per 1 MW of the connected heating load, the simple payback period of the mini-CHPP varies insignificantly and can be considered acceptable. The presence of a storage tank allows realizing the maneuverable capabilities of cogeneration units, while maintaining a high share of energy generation in combined mode. The district heating coefficient, equal to one, allows achieving high efficiency of fuel utilization for generation of both electrical and thermal energy. The research results can be used in municipal heat supply systems when introducing gas piston cogeneration units.

Key words: storage tank, load regulation, cogeneration, available heat capacity, usable heat capacity, heating load

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.1.021-030

Введение. Внедрение когенерационных технологий является перспективным направлением, позволяющим существенно повысить эффективность использования топливных ресурсов. К основным преимуществам когенерации можно отнести следующее. Использование комбинированной выработки тепловой и электрической энергии позволяет получить до 30 % экономии

топливных ресурсов по сравнению с раздельной схемой. Собственная генерация электрической энергии позволяет повысить надежность энергоснабжения как источника теплоснабжения, так и энергосистемы, к которой подключена мини-ТЭЦ. Следствием экономии топливных ресурсов является снижение загрязнения воздушного бассейна. Кроме того, преимуществом когенера-

ционных технологий является возможность использования топливных вторичных энергоресурсов [1].

Однако, несмотря на преимущества, которые дает когенерация, данная технология не получила широкого развития в Донецком регионе. Одной из причин такого состояния является то, что электрическая энергия, производимая в разное время суток, имеет разную ценность и принятие электрической нагрузки в сеть в ночной период является крайне проблематичным. В то же время для достижения наилучших экономических показателей внедрения когенерационных установок необходимо, чтобы они работали с наибольшим коэффициентом использования установленной мощности в собственно комбинированном режиме. Такие показатели могут быть достигнуты при условии внедрения когенерации для выполнения тепловой нагрузки горячего водоснабжения с использованием бака-аккумулятора горячей воды для согласования графиков производства и потребления тепловой энергии. В этом случае когенерационная установка может работать практически с постоянной мощностью, т. е. в базовом режиме производства энергии. А это при комплексном подходе, учитывающем эффективность работы других источников, выдающих нагрузку в сеть, в нашем регионе нецелесообразно.

В то же время когенерационные установки обладают хорошими маневренными возможностями, задействовав которые, можно улучшить показатели энергоэффективности энергосистемы в целом. Так, регулирование электрической нагрузки в энергосистеме производится регулированием мощности энергетических блоков ТЭС, что сопровождается снижением не только энергетической эффективности производства электроэнергии, но и остаточного ресурса оборудования.

Таким образом, если в правовом поле организовать условия работы мини-ТЭЦ таким образом, чтобы выдача электрической нагрузки в сеть учитывалась с зонным тарифным коэффициентом, то это даст возможность проектировать работу когенерационных установок таким образом, чтобы она не вредила показателям энергосистемы, а наоборот, улучшала их. В таком случае выдачу электрической мощности в энергосистему от мини-ТЭЦ необходимо снижать в часы ночного минимума и увели-

чивать в часы пика и полупика. В то же время тепловая нагрузка мини-ТЭЦ определяется совершенно другими параметрами и плохо согласуется с электрическими нагрузками. Поэтому возникает задача разработки эффективных методов регулирования нагрузок мини-ТЭС. Одним из таких методов может являться регулирование нагрузок мини-ТЭЦ за счет использования бака-аккумулятора (БА) тепловой энергии [2]. В [3] рассматривается возможность использования мазутных баков для аккумуляции тепловой энергии на примере Харьковской ТЭЦ-5. Условием целесообразности применения системы аккумуляции тепла является работа ТЭЦ в энергосистеме Украины по ценовым заявкам.

На целесообразность использования бака-аккумулятора для увеличения производства электроэнергии в дневной период и снижения ночью указывается также в [4], однако данных исследования не приводится.

Наличие бака-аккумулятора также позволит увеличить надежность теплоснабжения и безопасность работы источника теплоснабжения [5].

Методы исследования. Рассмотрим тепловую схему мини-ТЭЦ, основным генерирующим оборудованием которой являются газопоршневая когенерационная установка на примере Caterpillar G3516. Технические параметры когенерационной установки приведены в таблице. Для регулирования нагрузок мини-ТЭЦ рассматривается бак-аккумулятор.

Смысл использования БА в тепловой схеме мини-ТЭЦ состоит в том, чтобы накапливать тепловую энергию в то время, когда она может производиться когенерационными установками избыточно, т. е. в часы полупиковых и пиковых нагрузок энергосистемы, и расходовать в период ночного минимума, когда необходимо минимизировать производство электроэнергии. Тепловой утилизационный контур когенерационной установки (ТУК КГУ) имеет следующие составляющие: охладитель смеси; охлаждение рубашки двигателя и масла; охладитель дымовых газов. Температура охлаждающей жидкости на входе в контур в номинальном режиме составляет 70 °С, а на выходе – 90 °С. Причем для нормальной работы двигателя минимальная температура жидкости на входе в утилизационный контур не должна быть ниже 65 °С.

Технические параметры КГУ САТ G3516

Нагрузка, %	100	75	50
Мощность двигателя, кВт	1070	803	535
КПД двигателя, %	38,8	37,0	35,0
Тепловой КПД, %	47,5	48,8	50,1
Общий КПД, %	86,3	85,8	85,1
Удельный расход топлива, МДж/кВтч	9,28	9,72	10,29
Энергия топливного газа, кВт	2758	2167	1529
Теплоотдача в рубашку охлаждения, кВт	426	382	319
Теплоотдача в маслоохладитель, кВт	63	59	50
Теплоотдача в газовыхлоп, кВт	712	564	387
Теплоотдача в охладителе смеси, кВт	110	52	10

Примечание. Показатели КПД и расхода топлива соответствуют расчетным условиям: атмосферному давлению 101,325 кПа и температуре уходящих газов 150 °С.

Таким образом, можно считать, что работа тепловой части когенерационной установки производится с постоянной температурой охлаждающей жидкости на входе, что накладывает на тепловую схему свои ограничения. Принимаем конструкцию БА в виде цилиндрической емкости, разделенной подвижной перегородкой. При зарядке бака горячая вода поступает в его верхнюю часть, а перегородка перемещается вниз. Таким образом, накопление тепла происходит сразу с наибольшей температурой, которая имеется на выходе ТУК КГУ. При разрядке бака отбор воды в сетевой подогреватель происходит из верхней части бака, а охлажденная вода возвращается в нижнюю часть. При этом разделительная перегородка перемещается вверх.

На рис. 1 показана принципиальная схема мини-ТЭЦ с БА, по которой осуществляется подача тепла в систему отопления (СО).

Тепловую схему предлагаемой установки можно разделить на три контура: первичный, вторичный и отопительный. В первичном контуре вода циркулирует в системе БА – ТУК КГУ. Охлажденная вода из нижней части БА насосом подается в тепловой утилизационный контур когенерационной установки. Нагретая вода возвращается в верхнюю часть БА. Для поддержания требуемой температуры воды на входе в ТУК КГУ в первичном контуре предусмотрена переключка с трехходовым клапаном. Во вторичном контуре вода циркулирует в системе БА – сетевой подогреватель (СП). Сетевой подогреватель предназначен для нагрева сетевой воды, циркулирующей в СО. При необходимости подачи нагретой воды от ТУК КГУ непосредственно в сетевой подогреватель, минуя БА, в схеме предусмотрено две байпасные линии – в верхней и нижней части бака.

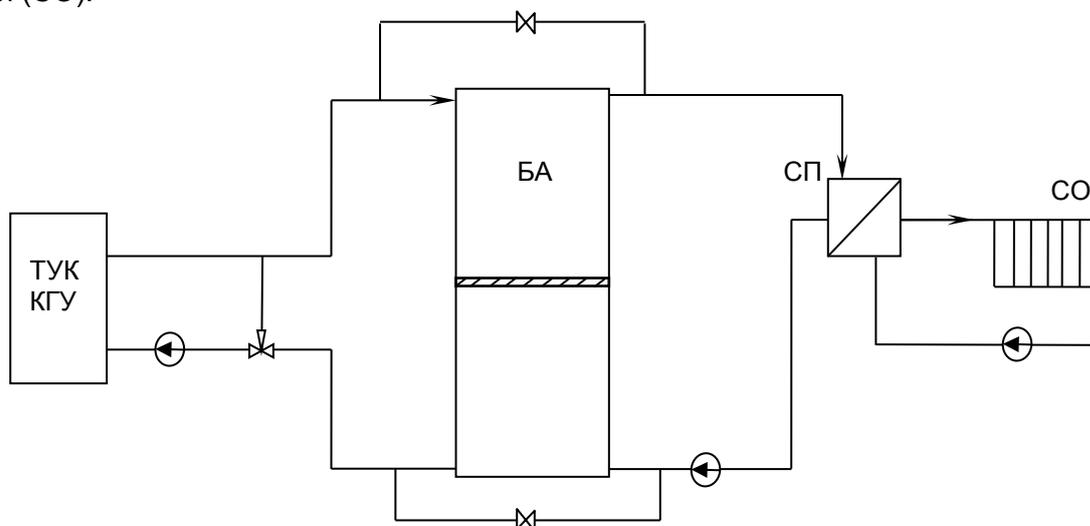


Рис. 1. Принципиальная схема мини-ТЭЦ с баком-аккумулятором: ТУК КГУ – тепловой утилизационный контур когенерационной установки; БА – бак-аккумулятор; СП – сетевой подогреватель; СО – система отопления

Потребители подключены непосредственно к сети, температурный график центрального качественного регулирования 85/60. Данный график является сейчас наиболее распространенным для подключения потребителей к тепловой сети г. Донецка.

Задача исследования состоит в определении зависимости установленной мощности когенерационной установки, количества электроэнергии, производимой в часы пика, полупика и ночного минимума суточного графика электрических нагрузок за весь отопительный период от проектной емкости БА. В данном исследовании может быть два подхода, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Первый подход основан на решении балансовых уравнений, характеризующих состояние системы в конкретных условиях, т. е. при заданной температуре наружного воздуха. Данной температурой определяется: температурный график и текущая тепловая мощность системы отопления, количество теплоты, которое может быть аккумулировано в баке исходя из его объема, а также тепловая и электрическая мощности когенерационной установки. Исходя из времени стояния температур наружного воздуха, а также считая равномерным распределение этих температур для полупикового, пикового и ночного периода суточного графика электрических нагрузок, можно определить количество электроэнергии, производимой за весь отопительный период в каждой зоне суточного графика. При этом считаем, что зарядка БА днем и его разрядка ночью происходит при одной и той же температуре, для которой определяются и все остальные параметры. Преимуществом данного подхода является простота и удобство расчета и проектирования системы. Однако такой подход не учитывает динамику состояния БА при текущих температурах наружного воздуха, что влияет на погрешность данного метода. Более точный результат даст моделирование работы мини-ТЭЦ, при которой учитывается изменение текущих температур наружного воздуха в течение отопительного периода. Однако такой подход не может быть использован самостоятельно для разработки рекомендаций при проектировании и расчете подобных систем, поскольку последовательность изменения температур наружного

воздуха каждый год является уникальной. Такое моделирование может использоваться для проверки результатов, полученных первым методом, и определения их погрешности.

Ниже рассмотрим методику расчета, основанную на балансовых уравнениях. Объем БА, который необходим для удовлетворения нагрузки отопления в заданных условиях, т. е. при соответствующей температуре наружного воздуха, зависит от температурного графика системы отопления и может быть определен по формуле

$$V_{\text{БА}} = \frac{R Q'_o \tau_{\text{ноч}} \cdot 3600}{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{БА1}} - t''_{\text{сп}}) \eta_{\text{БА}}},$$

где R – относительная тепловая нагрузка отопления, представляющая собой отношение текущей нагрузки отопления к расчетной:

$$R = \frac{Q_o}{Q'_o} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о}}};$$

Q'_o – расчетная нагрузка отопления, кВт, которая соответствует расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления; Q_o – нагрузка отопления при текущей температуре наружного воздуха, кВт; $t_{\text{р.о}}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С; $t_{\text{н}}$ – текущая температура наружного воздуха, °С; $t_{\text{вн}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха внутри отапливаемых помещений, °С; $\tau_{\text{ноч}}$ – период ночного минимума, во время которого предполагается осуществление отопления за счет энергии, накопленной в БА ($\tau_{\text{ноч}} = 8$ ч); $t_{\text{БА1}}$ – температура в верхней части бака-аккумулятора; $t''_{\text{сп}}$ – температура греющей воды на выходе из сетевого подогревателя. Данная температура определяется на основании теплового расчета сетевого подогревателя, выполненного по стандартной методике [6].

Проектный объем бака-аккумулятора определяется исходя из самостоятельного удовлетворения тепловой нагрузки мини-ТЭЦ в ночной период в условиях его проектирования. Условия проектирования БА задаются температурой наружного воздуха $t_{\text{р.БА}}$. Тогда относительная тепловая нагрузка, на которую рассчитывается бак-аккумулятор, составляет

$$R_{\text{пр.БА}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{р.БА}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о}}}.$$

Согласно приведенным выражениям, тепловая емкость бака-аккумулятора, выбранного для покрытия ночной отопительной нагрузки при некоторой температуре наружного воздуха $t_{p,BA}$, при температурах $t_{ч} > t_{p,BA}$ будет увеличиваться, что связано со снижением температуры сетевой воды, циркулирующей в отопительном контуре. Следовательно, коэффициент использования располагаемой тепловой емкости БА будет снижаться.

Тепловая мощность когенерационной установки должна обеспечивать накопление тепловой энергии в дневной период и выполнять текущую тепловую нагрузку. Поэтому расчетную тепловую мощность КГУ определим из следующей системы:

$$\text{при } R_{пр.БА} \geq \left(\frac{24 - \tau_{ноч}}{24} \right)$$

$$Q_T^{КГУ} = \frac{Q'_o}{\eta_{БА}} R_{пр.БА} \left(\frac{24}{24 - \tau_{ноч}} \right);$$

$$\text{при } R_{пр.БА} < \left(\frac{24 - \tau_{ноч}}{24} \right) \quad Q_T^{КГУ} = \frac{Q'_o}{\eta_{БА}}.$$

Поскольку тепловая и электрическая мощности когенерационной установки взаимосвязаны, то установленная электрическая мощность КГУ определяется по ее характеристикам. Поскольку диапазон изменения нагрузки одной газопоршневой установки составляет 50–100 % (относительная мощность $\bar{N}_e = 0,5-1$), а минимальное значение относительной тепловой нагрузки отопления $R = 0,25$, то количество устанавливаемых установок в мини-ТЭЦ должно быть не менее двух.

Согласно данным таблицы, тепловая мощность утилизационного контура когенерационной установки изменяется не пропорционально электрической. Это связано с тем, что в состав теплообменного оборудования КГУ входят разные типы теплообменных аппаратов, у которых зависимость теплопередачи от нагрузки изменяется по разным законам. Ниже приведены зависимости произведения коэффициента теплопередачи на поверхность теплообмена kF для теплообменников ТУК КГУ от относительной электрической мощности установки \bar{N}_e .

Для охладителя смеси

$$kF_{oc} = 2754,1 \cdot \bar{N}_e^{0,8556} \text{ Вт/К,}$$

степень достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9943$.

Для охладителя двигателя значение kF принимается постоянным с погрешностью менее 1 %:

$$kF_{д} = 46300 \text{ Вт/К.}$$

Для охладителя дымовых газов

$$kF_{дг} = 4536,3 \cdot \bar{N}_e^{0,9697} \text{ Вт/К, } R^2 = 0,9998.$$

Расчет параметров ТУК КГУ ведется на основании стандартных уравнений теплового баланса и теплопередачи.

Для определения времени работы мини-ТЭЦ в характерных режимах за весь отопительный период необходимо знать время стояния соответствующих температур наружного воздуха. Для этого воспользуемся методикой Б.Л. Шифринсона и В.Я. Хасилева [7]. Число часов стояния температур выше и равных $t_{ч}$ определяем по формуле

$$n = n_o \left(\frac{1-R}{B} \right)^{\frac{1}{\theta}},$$

где

$$B = \frac{8 - t_{cp,o}}{t_{вн} - t_{p,o}};$$

$$\theta = \frac{8 - t_{cp,o}}{t_{cp,o} - t_{p,o}};$$

$t_{cp,o}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С; n_o – продолжительность отопительного периода, ч.

Принимая температурный интервал для определения числа часов стояния заданной температуры 1 °С, имеем

$$n_t = n_o \left[\left(\frac{1-R}{B} \right)^{\frac{1}{\theta}} - \left(\frac{1-R'}{B} \right)^{\frac{1}{\theta}} \right],$$

где

$$R' = \frac{t_{вн} - t_{ч} - 1}{t_{вн} - t_{p,o}}.$$

Результаты исследования. Исходные данные для исследования: подключенная отопительная нагрузка $Q'_o = 1$ МВт; расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления $t_{p,o} = -22$ °С; расчетная средняя температура внутреннего воздуха в отапливаемых помещениях $t_{вн} = 18$ °С; продолжительность отопительного периода $n_o = 176$ дней; температурный график отопления 85/60 °С; КПД бака-аккумулятора $\eta_{БА} = 0,95$; период ночного минимума 23:00 – 7:00; период полупика

7:00 – 8:00, 11:00 – 20:00, 22:00 – 23:00; период пика 8:00 – 11:00, 20:00 – 22:00.

Зависимость проектного объема БА от расчетной температуры наружного воздуха, при которой бак будет иметь достаточный запас тепла для выполнения нагрузки отопления в ночной период, приведена на рис. 2.

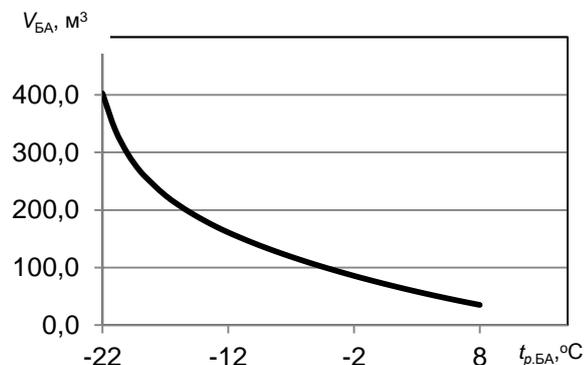


Рис. 2. Зависимость объема БА от температуры наружного воздуха $t_{р,БА}$

Согласно графику (рис. 2), значение расчетного объема БА при проектировании его для выполнения отопительной нагрузки в ночной период при расчетной температуре $t_{р,БА} = t_{р,о} = -22$ °C достигает 402,4 м³ в расчете на 1 МВт отопительной нагрузки. Эта величина является достаточно значительной и во многих случаях неприемлемой. В то же время для бака такого объема при увеличении температуры наружного воздуха потенциал накопления тепла растет ввиду увеличения располагаемой разности температур зарядки-разрядки, а необходимое количество для ночного использования падает. На рис. 3 показаны зависимости располагаемой и используемой тепловой мощности БА объемом $V_{БА} = 402,4$ м³ при различных температурах наружного воздуха.

Коэффициент использования располагаемой тепловой емкости БА за год для бака данного объема составляет $k_{и} = 0,09$. Такой низкий коэффициент связан не только с тем, что отопительная нагрузка составляет полгода, но и с тем, что наибольшее число часов стояния приходится на температуры от -5 до $+8$ °C. А для этих температур отношение используемой тепловой емкости к располагаемой имеет низкое значение.

При проектировании БА на температуры наружного воздуха $t_{р,БА} > t_{р,о}$ коэффициент использования располагаемой емко-

сти бака вырастет, однако при некоторых температурах часть отопительной нагрузки в ночной период придется выполнять за счет работы когенерационных установок.

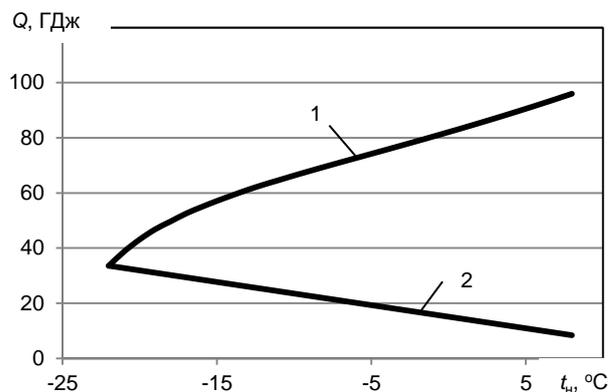


Рис. 3. Изменение располагаемой (1) и используемой (2) тепловой емкости БА, спроектированного для $t_{р,БА} = -22$ °C от температуры наружного воздуха

Покажем, как изменяются располагаемая и используемая тепловые емкости БА, рассчитанного на $t_{р,БА} = 0$ °C. Объем бака-аккумулятора при этом составит $V_{БА} = 74,1$ м³. Данная зависимость приведена на рис. 4.

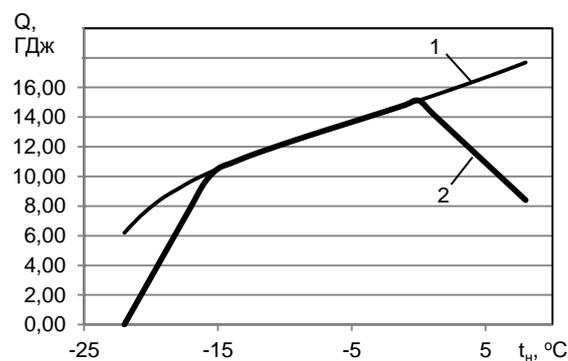


Рис. 4. Изменение располагаемой (1) и используемой (2) тепловой емкости БА, спроектированного для $t_{р,БА} = 0$ °C от температуры наружного воздуха

Согласно графику (рис. 4), располагаемая и используемая тепловые емкости на участке температур наружного воздуха от -15 до 0 °C совпадают. На этом участке запасенной днем теплоты не хватает на весь период ночного использования бака – вся располагаемая теплота используется полностью.

При температурах наружного воздуха ниже -15 °C располагаемая тепловая емкость бака, определенная исходя из его объема и разницы температур зарядки и

разрядки, больше реально используемой. Это связано с тем, что запас тепловой мощности когенерационных установок в этих условиях недостаточен для того, чтобы на 16 дневных часов зарядить бак до возможной тепловой емкости. При температуре $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ тепловая мощность КГУ соответствует отопительной нагрузке и запас мощности для зарядки БА отсутствует.

Покажем, как зависит количество выработанной электроэнергии за отопительный период в часы пиковых, полупиковых и минимальных нагрузок энергосистемы от емкости установленного БА. Данная зависимость приведена на рис. 5.

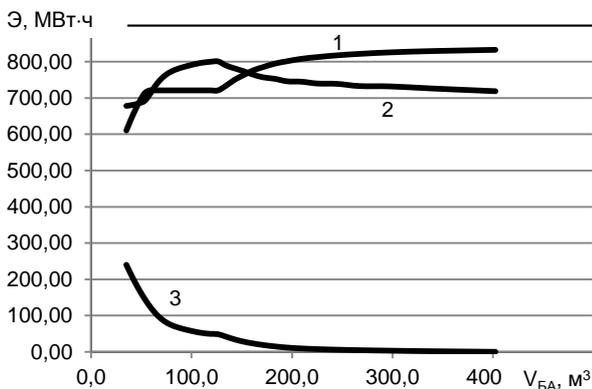


Рис. 5. Зависимость выработки электроэнергии за отопительный период в часы пика (1), полупика (2) и ночного минимума (3) от установленного объема БА

Анализ полученной зависимости (рис. 5) показывает, что при объеме БА свыше 126 м^3 (в расчете на 1 МВт подключенной отопительной нагрузки) показатели производимой когенерационными установками электроэнергии изменяются незначительно.

Интересна также зависимость выработки электроэнергии, но в удельной величине на 1 МВт установленной электрической мощности. Данная зависимость показана на рис. 6.

Анализ этой зависимости (рис. 6) показывает, что при увеличении объема БА свыше 126 м^3 показатели удельной выработки электроэнергии в часы пика и полупика падают, что связано с увеличением установленной тепловой мощности КГУ. Однако при этом коэффициент использования установленной мощности КГУ будет падать.

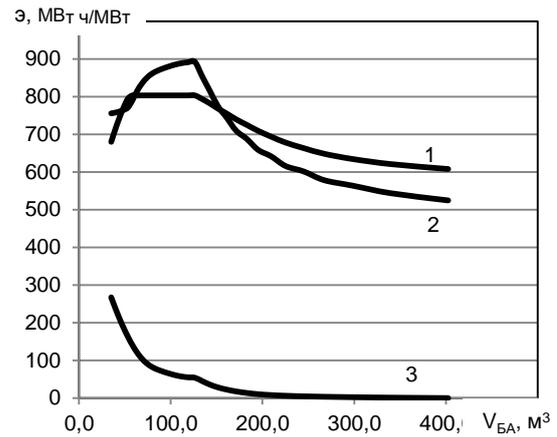


Рис. 6. Зависимость удельной выработки электроэнергии за отопительный период в часы пика (1), полупика (2) и ночного минимума (3) от установленного объема БА

Покажем зависимость простого срока окупаемости исследуемого объекта при следующих исходных данных: цена электроэнергии $4,14\text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$; цена тепла $2441,76\text{ руб/Гкал}$. Электроэнергия, производимая в часы пика учитывается с тарифным коэффициентом $k_{\text{п}} = 1,5$, в часы полупика $k_{\text{пп}} = 1,0$, в часы ночного минимума $k_{\text{н}} = 0,4$. Капитальные затраты учитывают стоимость когенерационных установок, затраты на их обслуживание, стоимость БА, а также сопутствующие затраты на проектирование и установку, которые зависят от основных. Данные затраты являются переменными, поэтому приведем значение, соответствующее условиям проектирования бака при минимальном сроке окупаемости: $K = 69,4\text{ млн руб}$. Данная зависимость приведена на рис. 7.

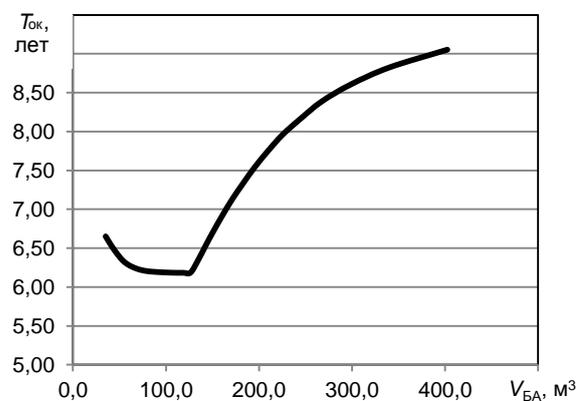


Рис. 7. Зависимость простого срока окупаемости мини-ТЭЦ от объема БА

Анализ зависимости (рис. 7) показывает, что при значениях объема свыше

126 м³ срок окупаемости резко возрастает, а, соответственно, эффективность использования денежных средств снижается. При объемах БА от 65 до 126 м³ срок окупаемости составляет около 6 лет.

Выводы. Предлагаемая схема использования бака-аккумулятора технически реализуема и позволяет существенно решить проблемы, возникающие при интеграции когенерационных установок в энергосистему.

Наличие бака-аккумулятора позволяет реализовывать маневренные возможности газопоршневых когенерационных установок, сохраняя при этом высокую долю производства энергии в комбинированном режиме.

В рассматриваемой схеме коэффициент теплофикации равен единице, поскольку предполагаемая отопительная нагрузка осуществляется за счет тепла, производимого когенерационными установками. Это значительно выше, чем в традиционных крупных ТЭЦ. При этом экономические показатели реализации подобного проекта могут быть приемлемыми. Интеграция в схему пикового источника тепла – отопительного котла – снизит коэффициент теплофикации, но может улучшить экономические показатели проекта.

Наличие бака-аккумулятора позволяет повысить надежность теплоснабжения в случае возникновения аварийных утечек в тепловой сети.

Внедрение когенерационных установок позволяет не только повысить эффективность использования топлива при производстве тепловой и электрической энергии, но и повысить надежность электроснабжения потребителей, для которых мини-ТЭЦ может рассматриваться как резервный источник питания. Кроме того, собственное производство электроэнергии повышает автономность источника теплоснабжения.

Список литературы

1. **Томаров Г.В., Рабенко В.С., Буданов В.А.** Мини-ТЭЦ на основе когенерационных технологий // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 1–6.
2. **Колесниченко Н.В.** Перспективы использования мини-ТЭЦ с регулированием нагрузок на базе систем аккумуляции теплоты // Актуальные эколого-политологические аспекты со-

временности: сб. науч. тр. II науч.-практ. конф. (в рамках XXVIII Моисеевских чтений: «Россия в XXI веке: глобальные вызовы, риски и решения»), 3 марта 2020 г., г. Донецк. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2020. – С. 47–52.

3. **Махотило К.В.** Оценка возможности создания теплоаккумуляционной установки на базе мазутных баков ТЭЦ // Проблемы загальної енергетики. – 2008. – № 17. – С. 50–60.

4. **Бегляк В.В.** Перспективные режимы работы оборудования ТЭЦ после ввода в эксплуатацию БелАЭС // Актуальные проблемы энергетики: материалы 73-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет, Секция «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника». – Минск: БНТУ, 2017. – С. 708–711.

5. **Колесниченко Н.В., Безбородов Д.Л., Боев Ю.А.** Обеспечение безопасности систем централизованного теплоснабжения районных котельных с использованием баков-аккумуляторов // Вестник Академии гражданской защиты. – 2020. – № 2(22). – С. 36–41.

6. **Наладка** и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. – М.: Стройиздат, 1988.

7. **Козин В.Е.** Теплоснабжение: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1980. – 408 с.

References

1. Tomarov, G.V., Rabenko, V.S., Budanov, V.A. Mini-TETs na osnove kogeneratsionnykh tekhnologiy [Mini-CHP based on cogeneration technologies]. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 2, pp. 1–6.
2. Kolesnichenko, N.V. Perspektivy ispol'zovaniya mini-TETs s regulirovaniem nagruzok na baze sistem akkumulyatsii teploty [Future of the use of mini-CHP with load regulation based on heat accumulation systems]. *Aktual'nye ekologopolitologicheskie aspekty sovremennosti: sbornik nauchnykh trudov II nauchno-prakticheskoy konferentsii (v ramkakh XXVIII Moiseevskikh chteniy: «Rossiya v XXI veke: global'nye vyzovy, riski i resheniya»)* [Topical ecological and political issues of our times: proceedings of research and practice conference (within the framework of the XXVIII Moiseev Readings: "Russia in the XXI century: global challenges, risks and solutions")]. Donetsk: GOUVPO «DONNTU», 2020, pp. 47–52.
3. Makhotilo, K.V. Otsenka vozmozhnosti sozdaniya teploakkumulyatsionnoy ustanovki na baze mazutnykh bakov TETs [Assessment of the possibility of creating a heat storage unit based on the fuel oil tanks of the CHPP]. *Problemi zagal'noy energetiki*, 2008, no. 17, pp. 50–60.

4. Beglyak, V.V. Perspektivnye rezhimy raboty oborudovaniya TETs posle vvoda v ekspluatatsiyu BelAES [Prospective operating modes of the CHPP equipment after the BelNPP commissioning]. *Materialy 73 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Aktual'nye problemy energetiki»* [Proceedings of the 73rd scientific-technical conference of undergraduate and graduate students "Topical issues of power engineering"]. Minsk: BNTU, 2017, pp. 708–711.

5. Kolesnichenko, N.V., Bezborodov, D.L., Boev, Yu.A. Obespechenie bezopasnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya rayonnykh

kotel'nykh s ispol'zovaniem bakov-akkumulyatorov [Ensuring the safety of centralized heating systems for district boilers using storage tanks]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity*, 2020, no. 2(22), pp. 36–41.

6. Manyuk, V.I., Kaplinskiy, Ya.I., Khizh, E.B., Manyuk, A.I., Il'in, V.K. *Naladka i ekspluatatsiya vodyanykh teplovykh setey* [Adjustment and operation of water heating networks]. Moscow: Stroyizdat, 1988.

7. Kozin, V.E. *Teplosnabzhenie* [Heat supply]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980. 408 p.