

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-376-390

УДК 621.311.22: 512.546

## Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей

В. Н. Романюк<sup>1)</sup>, А. А. Бобич<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>РУП «БелТЭИ» (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Дальнейшее совершенствование использования природного газа в энергетике связано с переходом к парогазовой технологии, прежде всего на теплоэлектроцентралях. Модернизацию технологии преобразования энергии топлива во вторичные энергопотоки эффективнее производить совместно с развитием тепловых схем ТЭЦ путем введения в их структуру тепловых аккумуляторов, абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, что обеспечивает не только улучшение энергетических, экономических и экологических показателей модернизации, но и развивает ТЭЦ в плане маневренности. Способность ТЭЦ обеспечивать тепловую нагрузку в полном объеме и без перерасхода топлива изменять мощность потока генерации электроэнергии чрезвычайно актуальна для энергосистем, в которой доминируют тепловые электростанции и при этом происходит вытеснение из генерации традиционных регуляторов ее мощности. Выполнение подобных проектов требует развития методов расчета тепловых схем ТЭЦ и определения соответствующих показателей. Приведены результаты численного исследования энергетических характеристик ТЭЦ с помощью топологических моделей существующих тепловых схем ТЭЦ, в которые интегрированы абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы для утилизации вторичных низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения. Приведены пример расчета, результаты оценки термодинамической эффективности ТЭЦ и изменение их энергетических характеристик для различных режимов работы в результате внедрения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов в состав ТЭЦ. Определены условия эффективного применения таких насосов, степень повышения термодинамической эффективности, изменения маневренности ТЭЦ повышенных начальных параметров и системная экономия природного газа в условиях Беларуси.

**Ключевые слова:** тепловые схемы, ТЭЦ, топологическая модель, термодинамическая эффективность, природный газ

**Для цитирования:** Романюк, В. Н. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 4. С. 376–390

## Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of their Topological Models

V. N. Romaniuk<sup>1)</sup>, A. A. Bobich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>“BelTEI” Republican Unitary Enterprise (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Further improvement of natural gas usage in power industry is associated with transition to the combined-cycle gas technology, primarily at combined heat and power plants (CHP).

### Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-16  
pte@bntu.by

### Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-16  
pte@bntu.by

Renovation of technology of conversion of fuel energy into heat and electricity flows is effective while it is performed simultaneously with the elaboration of thermal circuits of CHP by insertion heat accumulators and absorption lithium bromide heat pumps (ALBHP) in the structure of CHP; the mentioned insertion amends thermodynamic as well as economic and environmental indicators of CHP renovation and also develops CHP maneuverability. The ability of CHP to provide heat in required quantity, their capacity to change electricity generation output without excessive fuel consumption is extremely relevant for the energy system that incorporates thermal power plants as dominating component. At the same time the displacement of traditional electrical power regulators take place. Implementation of projects of this kind requires the elaboration of CHP flow diagram calculation methods and determining relevant indicators. The results of the numerical study of the energy characteristics of CHP with the aid of the topological models of the existing heat flow diagrams of CHP that incorporate ALBHP for recovery of low-temperature waste of heat flows of systems of cooling water circulating are presented in the article. An example of calculation, the results of the CHP thermodynamic efficiency evaluation, the change of the energy characteristics for different modes of operation of CHP caused by implementation of ALBHP are shown. The conditions for the effective application of lithium bromide absorption heat pumps are specified, as well as the rate of increase of thermodynamic efficiency; the changes of maneuverability of CHP with high initial parameters are identified, the natural gas savings in The Republic of Belarus are determined.

**Keywords:** thermal schemes, combined heat and power plants (CHP), topological model, thermodynamic efficiency, natural gas

**For citation:** Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of their Topological Models. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 376–390 (in Russian)

## Введение

Переход к парогазовым технологиям на ТЭЦ целесообразно осуществлять комплексно с одновременным совершенствованием тепловых схем с помощью мероприятий, обеспечивающих дальнейшее повышение степени использования природного газа и экономическую целесообразность всей модернизации. Одним из таких мероприятий является интеграция в тепловую схему ТЭЦ абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН) для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения [1–5]. Кроме улучшения технико-экономических характеристик, установка АБТН на ТЭЦ приводит к повышению маневренности ТЭЦ при сохранении отпуска тепловой энергии, что в условиях, когда за счет резкого увеличения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении имеет место вытеснение из генерации конденсационных мощностей, приобретает все большую значимость. Для использования современных вычислительных средств и программных пакетов расчета теплофизических свойств рабочих тел и теплоносителей с последующей автоматизацией определения комплекса энергетических характеристик ТЭЦ, условий эффективного применения АБТН необходим переход к использованию топологических моделей для численного исследования тепловых схем ТЭЦ.

## Топологические модели тепловых схем ТЭЦ

Основой топологического исследования является математическая модель, формализующая описание и расчет сложных систем, к которым отно-

сятся и ТЭЦ. Разработка математической модели осуществляется путем определения состава, структуры, совокупности режимных и конструктивных параметров, характеристик сырьевых потоков для расчета функции цели с учетом комплекса ограничений.

На начальном этапе создания модели определяются состав элементов и структура схемы [6, 7]. На следующем этапе на основании информации, полученной в результате предварительного обследования объекта моделирования (ТЭЦ с интеграцией в ее состав АБТН для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения), формируется его расчетная технологическая схема (рис. 1), которую целесообразно представить в виде графической структуры в соответствии с положениями теории графов. Это позволяет осуществить математически строгое и достаточно наглядное рассмотрение структуры технологической схемы, в которой приняты следующие обозначения: ПКА – паровой котлоагрегат; РНП – расширитель непрерывной продувки; ОД – охладитель дренажа; ХВО – химводоподготовка; ПУВ – подогреватель умягченной воды; ДПСВ – деаэратор подпитки сетевой воды; ДПК – деаэратор подпитки конденсата; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ПВД – подогреватель высокого давления; ПНД – подогреватель низкого давления; Д – деаэратор; К-р – конденсатор; ОСВ – обратная сетевая вода; ПСВ – прямая сетевая вода; СП1, СП2 – сетевые подогреватели; ДГ – дымовые газы; П – пар; ВП – влажный пар; К – конденсат; ЦВ – циркуляционная вода; МЭ – механическая энергия; ЭЭ – электроэнергия; ПВ – питательная вода; НЖ – насыщенная жидкость; НП – насыщенный пар; УВ – умягченная вода; СВ – сырая вода.

Первый шаг данного этапа – кодирование графа, для чего используются две матрицы: структурная и видов связей. В самом графе для этого нумеруются вершины и дуги графа. Для обозначения вершин, например, могут быть использованы римские цифры (I, II и т. д.), для дуг – арабские (1, 2 и т. д.). В итоге расчетная технологическая схема исследуемой системы оказывается представленной в виде ориентированного потокового графа (рис. 2). Упомянутая структурная матрица полностью отображает структуру графа технологической схемы системы и позволяет формализовать перевод ее на математический язык. Далее с помощью того же графа составляется матрица смежности, которая фиксирует наличие связей между элементами рассчитываемой системы и в результате ее математической обработки позволяет установить число контуров схемы и их элементный состав. На следующих шагах разработки топологической модели составляются матрицы процессов и контуров, которые используются для анализа схем: с помощью матрицы процессов устанавливается принадлежность элемента схемы к тому или иному контуру и, в конечном итоге, определяется последовательность расчета схемы; матрица контуров позволяет определить алгоритм расчета.

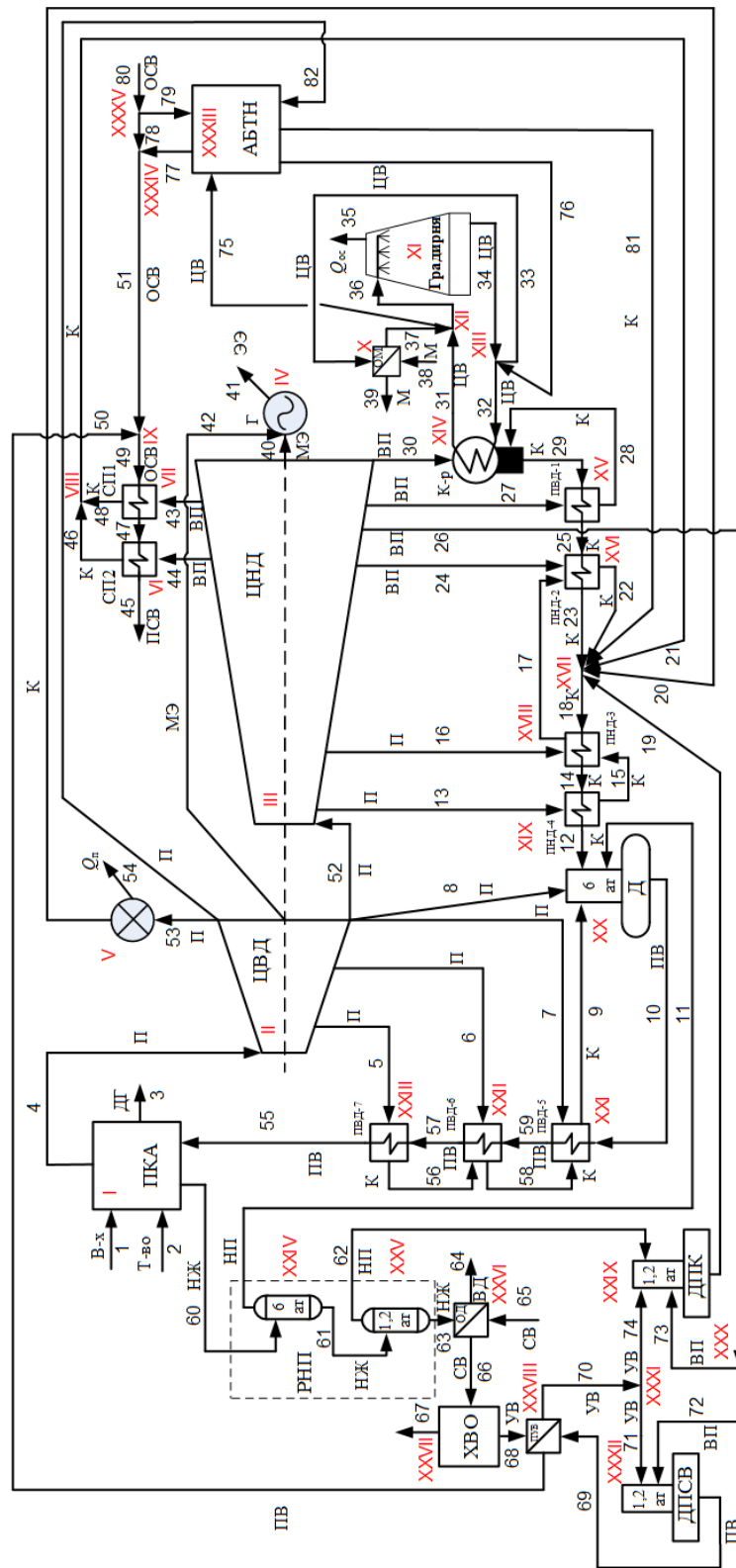


Рис. 1. Расчетная технологическая схема ТЭЦ с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом

Fig. 1. Estimated technological scheme of a combined heat and power plant with an absorption bromine-lithium heat pump

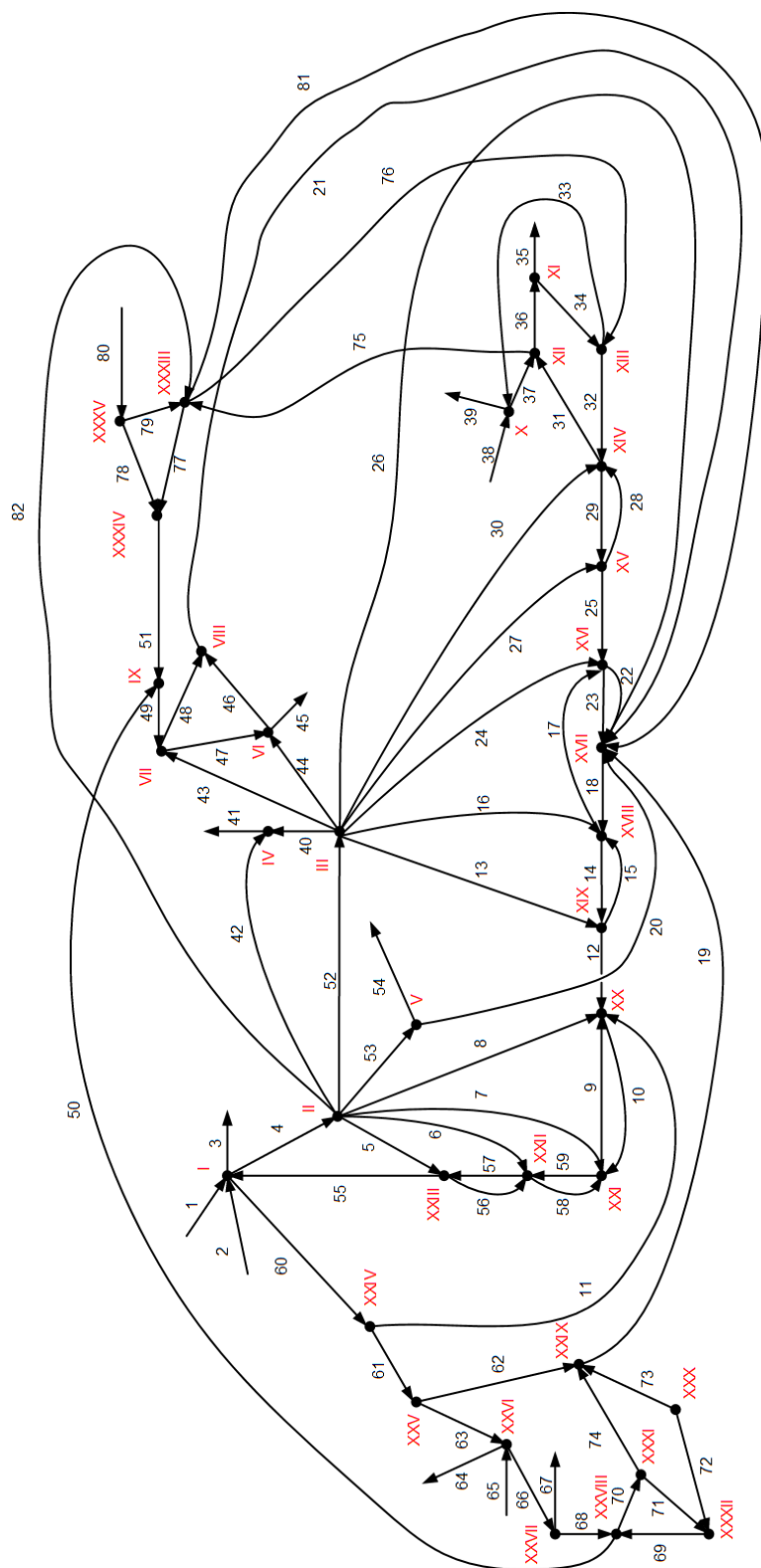


Рис. 2. Граф расчетной технологической схемы ТЭЦ с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом  
(диаграмма связей топологической модели ТЭЦ)

Fig. 2. Graph of the estimated technological scheme of a combined heat and power plant with an absorption bromine-lithium heat pump  
(the relationship diagram of topological model of a combined heat and power plant)

Затем для каждого элемента системы записываются уравнения:

– баланса энергии  $k$ -го элемента

$$\sum_{j=1}^{N_K} (\gamma G h)_j + \sum_{n=1}^{P_k} (\gamma E)_n = 0, \quad (1)$$

где  $G$  – расход энергоносителя;  $h$  – энтальпия энергоносителя;  $E$  – мощность электрической или механической связи;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий потери потока в окружающую среду;

– материального баланса для  $i$ -го энергоносителя в  $k$ -м элементе

$$\sum_{j=1}^{N_{ki}} G_j = 0. \quad (2)$$

В итоге составляется система балансовых уравнений и производится анализ функциональных связей ее параметров. Число параметров в этой системе, как правило, намного превышает количество уравнений. Однако при заданных производительности, конструкции, термодинамических и расходных параметрах установки, избыточных по отношению к числу уравнений, расчет такой системы дает однозначное действительное решение. При этом конкретный допустимый состав совокупности независимых параметров для теплотехнической системы определяется с помощью матрицы функциональных связей, согласно которой для каждого  $n$ -го уравнения  $k$ -го элемента системы оставляется один такой зависимый параметр, определяемый из этого уравнения, который не может быть найден из уравнения балансов для соседнего элемента. Тем самым обеспечивается совместимость уравнений по отдельным элементам и в целом по системе.

Сокращенная система балансовых уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha V_0 G_2 + G_2 - G_3 = 0; \\ G_{10} - G_4 - k_1 G_{10} = 0; \\ \alpha V_0 G_2 h_1 + \gamma_2 G_2 (Q_{\pi}^p + h_2) + G_{10} h_{55} - G_4 h_4 - G_3 h_3 - k_1 G_{10} h_{60} = 0; \\ G_4 - G_5 - G_6 - G_7 - G_8 - G_{52} - G_{20} - G_{81} = 0; \\ G_4 h_4 - G_5 h_5 - G_6 h_6 - G_7 h_7 - G_8 h_7 - G_{52} h_7 - G_{20} h_7 - G_{81} h_7 - E_{42} = 0; \\ G_{52} - G_{13} - G_{16} - G_{24} - G_{26} - G_{27} - G_{30} - G_{43} - G_{44} = 0; \\ G_{52} h_{52} - G_{13} h_{13} - G_{16} h_{16} - G_{24} h_{24} - G_{26} h_{26} - G_{27} h_{27} - G_{30} h_{30} - G_{43} h_{43} - G_{44} h_{44} - E_{40} = 0; \\ E_{40} + E_{42} - E_{41} = 0; \\ G_{20} h_7 - G_{20} h_{20} - Q_{54} = 0; \\ G_{44} h_{44} - G_{44} h_{46} + G_{45} h_{47} - G_{45} h_{45} = 0; \\ G_{45} h_{49} - G_{45} h_{47} + G_{43} h_{43} - G_{43} h_{48} = 0; \\ G_{43} + G_{44} - G_{21} = 0; \\ G_{43} h_{46} + G_{44} h_{48} - G_{21} h_{21} = 0; \end{array} \right.$$

$$\begin{cases}
k_2 G_{45} + G_{51} - G_{45} = 0; \\
k_2 G_{45} h_{50} + G_{51} h_{51} - G_{45} h_{49} = 0; \\
G_{38} h_{38} - G_{38} h_{39} + G_{33} h_{32} - G_{33} h_{37} = 0; \\
G_{34} h_{36} - G_{34} h_{32} - Q_{35} = 0; \\
G_{31} + G_{33} - G_{34} - G_{75} = 0; \\
G_{31} h_{31} + G_{33} h_{37} - G_{34} h_{36} - G_{75} h_{36} = 0; \\
G_{30} + G_{27} - G_{23} = 0; \\
G_{30} h_{30} + G_{31} h_{32} + G_{27} h_{28} - G_{23} h_{29} - G_{31} h_{31} = 0; \\
G_{27} h_{27} - G_{27} h_{28} + G_{23} h_{29} - G_{23} h_{25} = 0; \\
G_{17} + G_{24} - G_{22} = 0; G_{17} h_{17} + G_{24} h_{24} + G_{23} h_{25} - G_{22} h_{22} - G_{23} h_{23} = 0; \\
G_{19} + G_{20} + G_{21} + G_{22} + G_{23} - G_{12} + G_{81} = 0; \\
G_{19} h_{19} + G_{20} h_{20} + G_{21} h_{21} + G_{22} h_{22} + G_{23} h_{23} - G_{12} h_{18} + G_{81} h_{81} = 0; \\
G_{13} + G_{16} - G_{17} = 0; \\
G_{13} h_{15} + G_{16} h_{16} - G_{17} h_{17} + G_{12} h_{18} - G_{12} h_{14} = 0; \\
G_{13} h_{13} - G_{13} h_{15} + G_{12} h_{14} - G_{12} h_{12} = 0; \\
G_8 + G_9 + G_{11} + G_{12} - G_{10} = 0; \\
G_8 h_7 + G_9 h_9 + G_{11} h_{11} + G_{12} h_{12} - G_{10} h_{10} = 0; \\
G_7 + G_{58} - G_9 = 0; \\
G_7 h_7 + G_{58} h_{58} - G_9 h_9 + G_{10} h_{10} - G_{10} h_{59} = 0; \\
G_6 + G_5 - G_{58} = 0; \\
G_6 h_6 + G_5 h_{56} - G_{58} h_{58} + G_{10} h_{59} - G_{10} h_{57} = 0; \\
G_5 h_5 - G_5 h_{56} + G_{10} h_{57} - G_{10} h_{55} = 0; \\
k_1 G_{10} - G_{11} - G_{61} = 0; \\
G_{60} h_{60} - G_{11} h_{11} - G_{61} h_{61} = 0; \\
G_{61} - G_{62} - G_{63} = 0; \\
G_{61} h_{61} - G_{62} h_{62} - G_{63} h_{63} = 0; \\
G_{63} h_{63} - G_{63} h_{64} + G_{65} h_{65} - G_{65} h_{66} = 0; \\
G_{65} - k_1 \cdot G_{65} - G_{68} = 0; \\
G_{68} h_{66} - G_{68} h_{66} + G_{50} h_{69} - G_{50} h_{50} = 0; \\
G_{62} + G_{73} + G_{74} - G_{19} = 0; \\
G_{62} h_{62} + G_{73} h_{26} + G_{74} h_{70} - G_{19} h_{19} = 0; \\
G_{26} - G_{72} - G_{73} = 0; \\
G_{68} - G_{71} - G_{74} = 0; \\
G_{71} + G_{72} - k_1 \cdot G_{45} = 0; \\
G_{71} h_{70} + G_{72} h_{26} - k_1 G_{45} h_{69} = 0; \\
G_{51} - k_3 G_{51} - G_{78} = 0; \\
k_3 G_{51} h_{77} + G_{78} h_{80} - G_{51} h_{51} = 0; \\
k_3 G_{51} h_{80} - k_3 G_{51} h_{77} + G_{75} h_{36} - G_{75} h_{32} + G_{81} h_7 - G_{81} h_{81} = 0; \\
\mu (G_{81} h_7 - G_{81} h_{81}) - k_3 G_{51} h_{77} - k_3 G_{51} h_{80} = 0,
\end{cases}$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода воздуха;  $V_0$  – теоретический расход воздуха для сжигания единицы топлива, кг/кг;  $G_2$  – расход природного газа, кг/с;

$G_3$  – то же дымовых газов, кг/с;  $G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_{11}, G_{13}, G_{16}, G_{24}, G_{26}, G_{27}, G_{30}, G_{43}, G_{44}, G_{52}, G_{62}, G_{72}, G_{73}, G_{82}$  – то же пара, кг/с;  $G_9, G_{12}, G_{17}, G_{20}, G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{58}, G_{81}$  – то же конденсата, кг/с;  $G_{10}$  – то же питательной воды, кг/с;  $G_{19}, G_{50}$  – то же подпиточной воды, кг/с;  $G_{31}, G_{33}, G_{34}, G_{75}$  – то же циркуляционной воды, кг/с;  $G_{38}$  – то же масла, кг/с;  $G_{45}, G_{51}, G_{77}, G_{78}$  – то же сетевой воды, кг/с;  $G_{60}, G_{61}, G_{63}$  – то же насыщенной воды, кг/с;  $G_{65}$  – то же сырой воды, кг/с;  $G_{68}, G_{71}, G_{74}$  – то же умягченной воды, кг/с;  $h_1$  – энтальпия воздуха, кДж/кг;  $h_2$  – то же природного газа, кДж/кг;  $h_3$  – то же дымовых газов, кДж/кг;  $h_4, h_5, h_6, h_7, h_{11}, h_{13}, h_{16}, h_{24}, h_{26}, h_{27}, h_{30}, h_{43}, h_{44}, h_{62}, h_{82}$  – то же пара, кДж/кг;  $h_9, h_{12}, h_{14}, h_{15}, h_{17}, h_{18}, h_{20}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{25}, h_{28}, h_{29}, h_{46}, h_{48}, h_{56}, h_{58}, h_{81}$  – то же конденсата, кДж/кг;  $h_{10}, h_{55}, h_{57}, h_{59}$  – то же питательной воды, кДж/кг;  $h_{19}, h_{50}, h_{69}$  – то же подпиточной воды, кДж/кг;  $h_{31}, h_{32}, h_{36}, h_{37}$  – то же циркуляционной воды, кДж/кг;  $h_{38}, h_{39}$  – то же масла, кДж/кг;  $h_{45}, h_{47}, h_{49}, h_{51}, h_{77}, h_{80}$  – то же сетевой воды, кДж/кг;  $h_{60}, h_{61}, h_{63}$  – то же насыщенной воды, кДж/кг;  $h_{64}$  – то же воды в дренаж, кДж/кг;  $h_{65}, h_{66}$  – то же сырой воды, кДж/кг;  $h_{70}$  – то же умягченной воды, кДж/кг;  $\gamma$  – коэффициент потерь в окружающую среду, отнесенный к  $i$ -му элементу;  $E_{40}, E_{41}, E_{42}$  – мощность, кВт;  $Q_{35}, Q_{54}$  – тепловая нагрузка, кВт;  $Q_n^p$  – теплота сгорания, кДж/кг;  $k_1$  – доля продувки;  $k_2$  – то же подпитки теплосети;  $k_3$  – то же сетевой воды на АБТН;  $\mu$  – отопительный коэффициент АБТН.

Для расчета термодинамических свойств воды и водяного пара и определения их энтальпий использовали уравнения Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах для давлений от 0 до 100 МПа и температур от 0 до 2273,15 К) [8, 9]. Для расчета процессов, протекающих в паровой турбине, использовали проектно-расчетные данные паровой турбины ПТ-60-130 с учетом реальных энергетических характеристик на различных режимах работы и поправочных коэффициентов конкретной ТЭЦ (рис. 3). В качестве исходных данных задаются тепловая нагрузка, параметры пара, температуры прямой и обратной сетевой воды и др.

В результате решения системы балансовых уравнений вычисляются параметры и расходы потоков в характерных узлах тепловой схемы. Определяются расходы пара, топлива на котел и мощность турбоустановки. Учитываются собственные нужды станции и рассчитывается комплекс энергетических характеристик: удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ, электрический абсолютный КПД, электрический КПД, коэффициент полезного использования топлива, удельный расход условного топлива (УРТ) на отпуск электроэнергии при заданном УРТ на отпуск тепловой энергии [10].

На основании топологических моделей проведена оценка энергетической эффективности ТЭЦ для двух вариантов тепловых схем: с АБТН и без него.



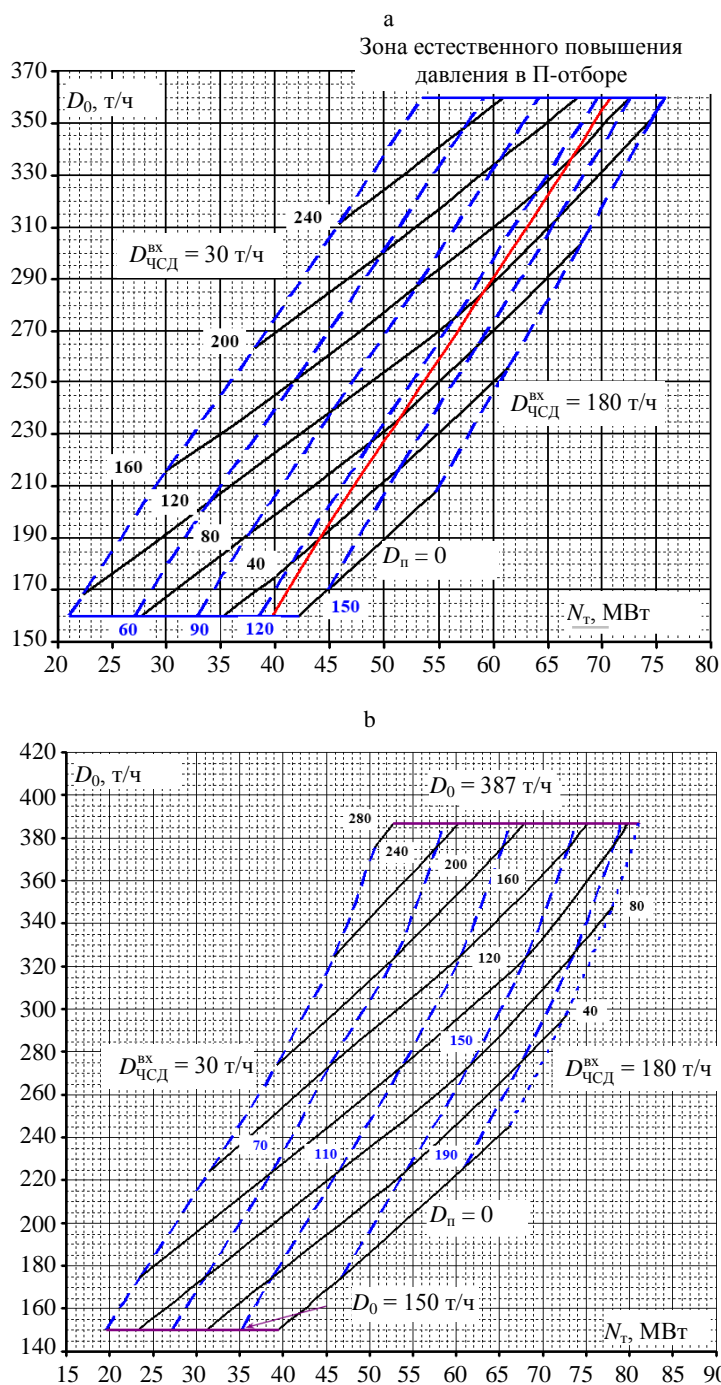


Рис. 3. Зависимость мощности турбины ПТ-60 от расхода пара на турбину и тепловой нагрузки регулируемых отборов (режимная карта):  
а – Светлогорская ТЭЦ; б – Бобруйская ТЭЦ-2

Fig. 3. The dependence of the power of PT-60 turbine upon the steam consumption for a turbine and upon the thermal load of the controlled extractions (regime card)  
а – Svetlogorsk Thermal Power Plant; б – Bobruisk Thermal Power Plant No 2

### Оценка энергетической эффективности ТЭЦ

Для оценки эффективности комбинированной выработки энергии на ТЭЦ используется комплекс энергетических характеристик, в состав которого включены [10]:

- 1) абсолютный электрический КПД

$$\eta_{э,абс} = W_э / Q_{топл}, \quad (3)$$

где  $W_э$  – производство электроэнергии, ГДж;  $Q_{топл}$  – теплота процесса горения топлива, ГДж;

- 2) коэффициент полезного использования топлива

$$\eta_{ит} = (W_э + Q_т) / Q_{топл}, \quad (4)$$

где  $Q_т$  – отпуск тепловой энергии, ГДж;

- 3) термодинамическая эффективность комбинированной системы генерации энергопотоков, которая оценивается эксергетическим КПД [11]:

$$\eta_e = (W_э + E_q'') / E', \quad (5)$$

где  $E_q''$  – эксергия выходных потоков используемой тепловой энергии, ГДж;  $E'$  – эксергетический вход системы, ГДж. Для оценки комбинированной выработки энергии применяются и другие энергетические характеристики, которые вытекают из соотношений (3), (4);

- 4) электрический КПД

$$\eta_э = W_э / (Q_{топл} - Q_т) = \eta_{э,абс} / (1 - \eta_{ит} + \eta_{э,абс}); \quad (6)$$

- 5) удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении

$$\omega_{э,q} = W_э / Q_т = \eta_{э,абс} / (\eta_{ит} - \eta_{э,абс}). \quad (7)$$

При рассмотрении перечисленных энергетических характеристик ТЭЦ удобно обратиться к графическому пояснению (рис. 4).

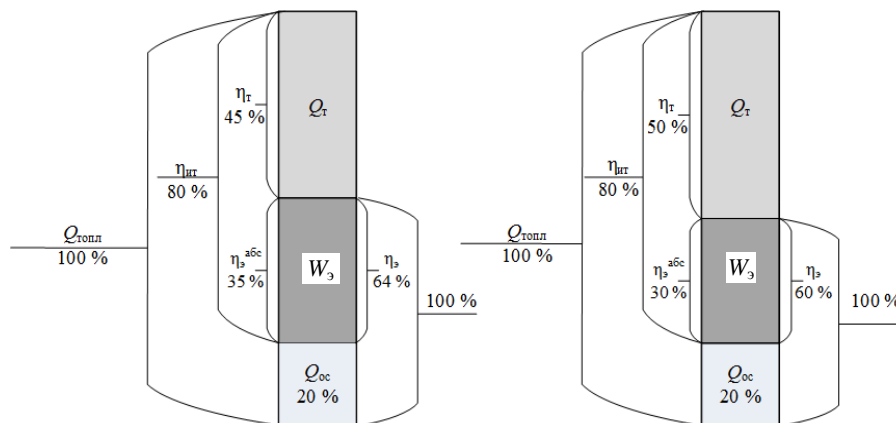


Рис. 4. Сравнение двух источников с комбинированной выработкой энергии при одинаковом коэффициенте использования топлива и различном электрическом абсолютном КПД

Fig. 4. Comparison of the two sources with the combined energy production at the same fuel utilization factor and different absolute electrical efficiency

При одинаковом коэффициенте использования топлива совершеннее оказывается ТЭЦ с более высоким электрическим абсолютным КПД;

б) расход топлива для выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ определяется известным соотношением

$$B = Q_{\text{топл}} / Q_{\text{н}}^{\text{p}}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания топлива, ГДж/кг.

Необходимость разделения технологического расхода топлива на тепловую и электрическую энергию связана с практикой оценки комбинированного источника по УРТ на выработку электроэнергии, определяемому по физическому методу. В этом случае одним из условий получения правильного результата является использование во всех сравниваемых вариантах одной и той же величины договорного расхода топлива на тепловую энергию независимо от технологического расхода топлива. Тогда можно определить суммарную экономию топлива по изменению УРТ на выработку электроэнергии, для чего рассчитываются следующие показатели;

7) расход топлива на выработку тепловой энергии

$$B_{\text{т}} = b_{\text{т}} Q_{\text{т}}, \quad (9)$$

где  $b_{\text{т}}$  – удельный расход топлива на выработку тепловой энергии, одинаковый для всех альтернативных вариантов, кг/ГДж;

8) удельный расход топлива на выработку электроэнергии

$$b_{\text{э}} = (B - B_{\text{т}}) / W_{\text{э}}. \quad (10)$$

После математических преобразований несложно установить связь УРТ на выработку электроэнергии с двумя относительными характеристиками: электрическим абсолютным КПД, коэффициентом полезного использования топлива и договорного УРТ на отпуск тепловой энергии, приведенными ранее ( $\eta_{\text{ит}}$  и  $\eta_{\text{э,абс}}$ ):

$$b_{\text{э}} = 1 / \eta_{\text{э,абс}} [1 / Q_{\text{н}}^{\text{p}} - b_{\text{т}} (\eta_{\text{ит}} - \eta_{\text{э,абс}})]. \quad (11)$$

Дополняет оценку вариантов расчет термодинамического КПД с помощью соотношения, использующего понятия транзитной эксергии:

$$\eta_{\text{е}} = (\Sigma E'' - E^{\text{тр}}) / (\Sigma E' - E^{\text{тр}}) = 1 - \Sigma D / (\Sigma E' - E^{\text{тр}}) = E_{\text{исп}} / E_{\text{расп}}, \quad (12)$$

где  $\Sigma E''$  – эксергетический выход системы, ГДж;  $E^{\text{тр}}$  – транзитная эксергия (не претерпевающая ни количественных, ни качественных изменений в технической системе), ГДж;  $\Sigma E'$  – эксергетический вход системы, ГДж;  $\Sigma D$  – суммарные потери эксергии;  $E_{\text{исп}}$  – полезная эксергия, ГДж;  $E_{\text{расп}}$  – располагаемая эксергия, ГДж (рис. 5).

Эксергетическая оценка эффективности не нашла широкого применения в энергетике, поскольку для систем производства электроэнергии положения максимумов эксергетического и энергетического КПД совпадают [12].

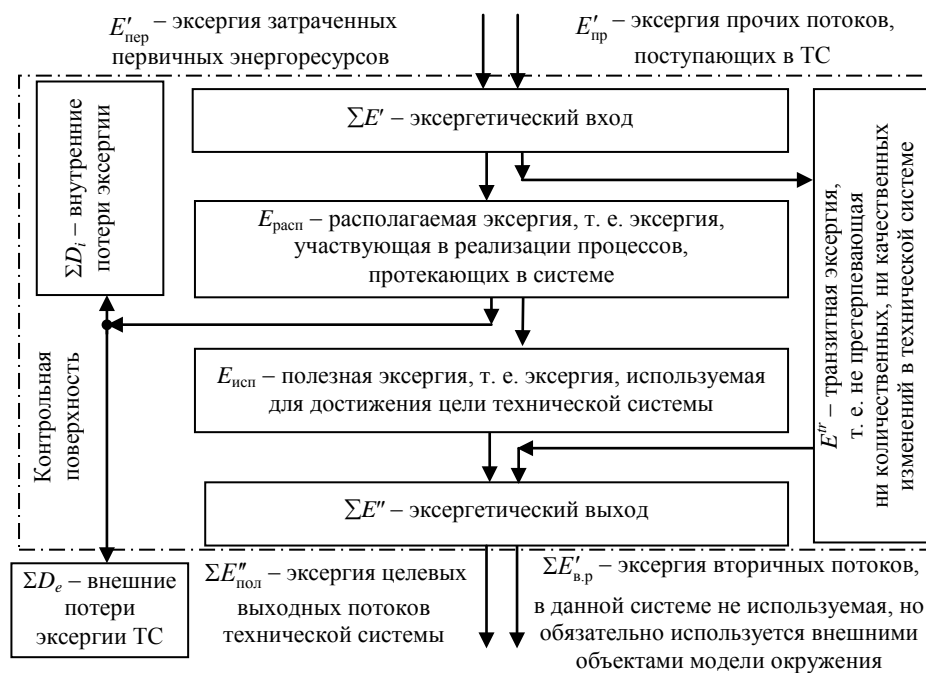


Рис. 5. Схема эксергетических потоков технической системы (ТС)

Fig. 5. Diagram of the exergy flows of the technical system (TS)

Вместе с тем для сравнения вариантов ТЭЦ она полезна наряду с получившей более широкое применение оценкой по суммарному годовому расходу топлива в системе «ТЭЦ – замещающая КЭС – замещающая водогрейная котельная» [13].

### Результаты расчетов энергетических характеристик ТЭЦ с применением топологических моделей

На базе разработанных топологических моделей и приведенной методики оценки энергетической эффективности ТЭЦ проведены расчеты для различных тепловых нагрузок ТЭЦ, в тепловую схему которой интегрирован АБТН. Полученные результаты сравнивались с существующими энергетическими показателями ТЭЦ без АБТН. Результаты расчета даны на рис. 6.

В результате использования АБТН эксергетический, электрический КПД ТЭЦ, коэффициент полезного использования топлива увеличиваются (рис. 6). При этом снижаются: УРТ на отпуск электроэнергии – на 30–50 г/(кВт·ч), расход условного топлива на ТЭЦ – на 2,1–3,2 т/ч, электрическая мощность ТЭЦ – на 4,8–9,3 МВт и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ – до 85 кВт·ч/Гкал, что отвечает требованиям энергосистемы в обеспечении нагрузок в ближайшей перспективе с вводом Белорусской АЭС.

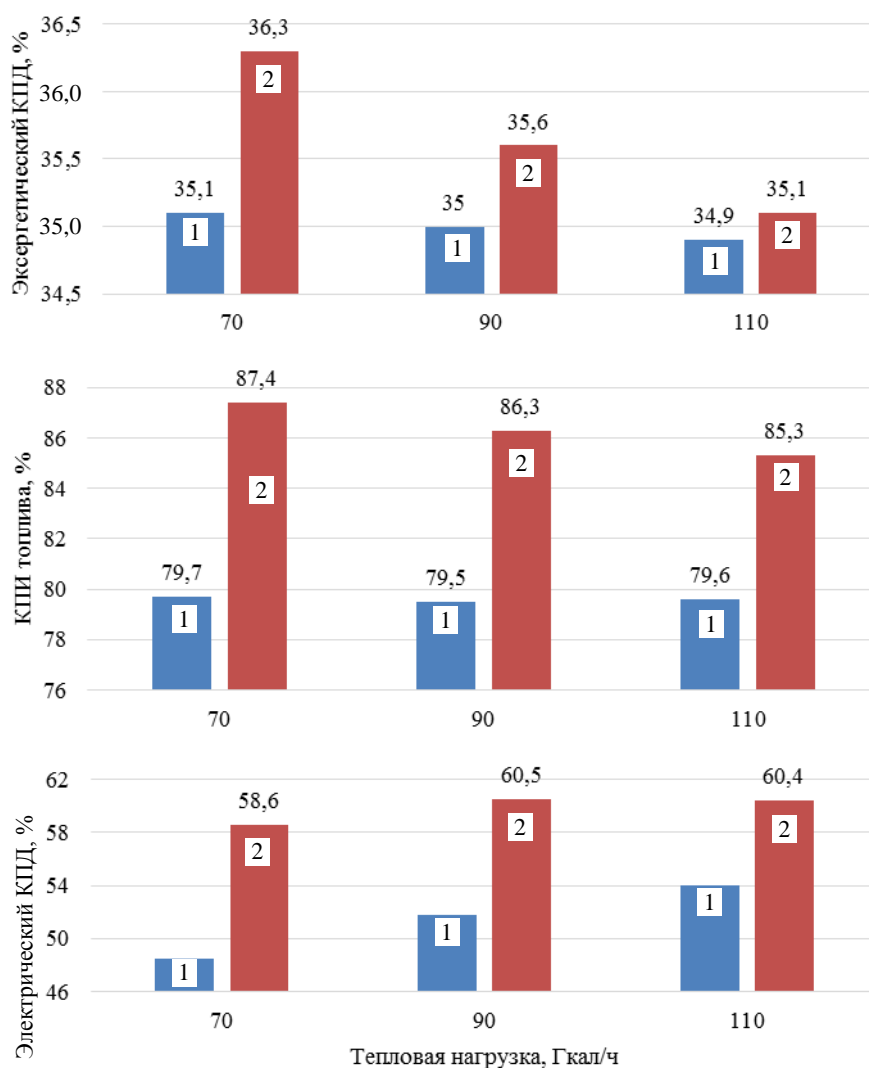


Рис. 6. Сравнение энергетических характеристик ТЭЦ существующей тепловой схемы (1) и после внедрения абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса (2) (показатели увеличиваются)

Fig. 6. Comparison of the energy characteristics of CHP of the existing thermal scheme (1) after implementation of the absorption bromine-lithium heat pump (2) (the indications are increasing)

При минимально допустимом пропуске пара в конденсатор, т. е. при постоянном отпуске тепловой энергии от АБТН, эксергетический, электрический КПД, коэффициент полезного использования топлива возрастают, и по мере роста тепловых нагрузок темп роста КПД снижается из-за уменьшения вклада АБТН.

Из приведенной информации следует, что установка АБТН на ТЭЦ целесообразна энергетически и экономически при системной экономии природного газа, что доказано в [1, 3–5].

## ВЫВОДЫ

1. Расчеты тепловых схем и их автоматизация для осуществления численного исследования наименее затратно реализовывать на базе топологических моделей.

2. Полученные результаты доказывают существенное улучшение энергетических характеристик ТЭЦ в результате утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы охлаждения циркуляционной воды с помощью абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, интегрируемых в состав тепловой схемы станции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокompрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4–5. С. 7–10.
2. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2013. № 1. С. 14–19.
3. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2015. № 1. С. 13–20.
4. Романюк, В. Н. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 4. С. 31–43.
5. Романюк, В. Н. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2016. № 1. С. 14–23.
6. Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. М.: Энергия, 1978. 342 с.
7. Седнин, В. А. Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: учеб. метод. пособие по курсовому проектированию для студ. энергетич. специальностей по спец. Т.01.02 «Теплоэнергетика» / В. А. Седнин. Минск: БГПА, 2001. 65 с.
8. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam [Электронный ресурс] // International Association for the Properties of Water and Steam. 2014. Режим доступа: <http://www.lanomixsoftware.com/steam>. Дата доступа: 08.07.2014.
9. Александров, А. А. Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 1: Основные уравнения / А. А. Александров // Теплоэнергетика. 1999. № 9. С. 69–77.
10. Андрущенко, А. И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А. И. Андрущенко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы IV Рос. науч.-техн. конф., Ульяновск, 24–25 апр. 2003 г. / Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск, 2003. С. 12–14.
11. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
12. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
13. Дудолин, А. А. Исследование влияния климатических условий и типа ГТУ на выбор структуры тепловых схем парогазовых ТЭЦ утилизационного типа / А. А. Дудолин. М.: МЭИ, 2004. 20 с.

Поступила 19.04.2016    Подписана в печать 20.06.2016    Опубликовано онлайн 03.08.2016

## REFERENCES

1. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Malkov S. V. (2013) Absorption or Vapor Compression Heat Pumps in the Schemes of Thermal Power Plants. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 4–5, 7–10 (in Russian).
2. Romaniuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaia N. A., Bubyр T. V., Malkov S. V. (2013) Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of a Thermal Power Plant Aimed at the Increase of its Power Efficiency. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 14–19 (in Russian).
3. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2015) Absorption Heat Pumps at a Thermal Power Plant of the United Power System on the Behalf of the Mozyr Thermal Power Plant. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 13–20 (in Russian).
4. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2015) Development of the Chp-Thermal Schemes in Contexts of the Consolidated Energy System of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii I Energeticheskikh Obiedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 4, 31–43 (in Russian).
5. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Justification of ABTN Parameters for Disposal of Secondary Energy Resources in CHP at Thermal Power Plants by Means of a Passive Experiment and Determining the Appropriate Changes in the Various Estimates of the Power System. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 14–23 (in Russian).
6. Popyrin P. S. (1978) *Mathematical Modeling and Optimization of Thermal Power Plants*. Moscow, Energiya. 342 (in Russian).
7. Sednin V. A. (2001) *Modeling, Optimization and Control of Thermal Systems*. Minsk, BSPA. 65 (in Russian).
8. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (2014). *International Association for the Properties of Water and Steam*. Available at: <http://www.lanomixsoftware.com/steam>. (Accessed 08 June 2014).
9. Aleksandrov A. A. (1998) The IAPWS-IF97 Formulation for the Thermodynamic Properties of Water and Steam for Industrial Use. Part 1: Basic Equations. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 9, 69–77 (in Russian).
10. Andryuschchenko A. I. (2003) Indicators of Efficiency of Complex Systems of Energy Supply and the Relationship Between them. *Energoberezhenie v Gorodskom Khoziaistve, Energetike, Promyshlennosti: Materialy IV Ros. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Power Saving in Municipal Economy, Power Engineering and Industry. Materials of the IV Russian Scientific-and-Practical Conference]. Ulyanovsk State Technical University. Ulyanovsk, 12–14 (in Russian).
11. Brodyansky V. M., Fratcher V., Mihalek K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 (in Russian).
12. Brodyansky V. M. (1973) *Exergy Method of Thermodynamics Analysis*. Moscow, Energiya. 296 (in Russian).
13. Dudolin A. A. (2004) *Study of the Influence of Climatic Conditions and Type of Gas Turbines to the Choice of the Structure of Thermal Combined-Cycle Recycling-Type CHP*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute. 20 (in Russian).

Received: 19.04.2016

Accepted: 20.06.2016

Published online: 03.08.2016