



ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОТЛА ПОСРЕДСТВОМ ПИНЧ-МЕТОДА

Е.А. Юшкова, В.А. Лебедев

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

atenoks@mail.ru

Резюме: Данная статья поможет рассмотреть проблему термодинамической оптимизации теплоэнергетического оборудования. Решение данного вопроса позволяет повысить энергоэффективность тепловых систем путем снижения затрат энергетических ресурсов. Существует большое количество методов для исследования энергетических установок, в работе совмещены два метода: эксергетический и пинч метод. Эксергетический анализ тепловых систем показывает количественные и качественные характеристики эффективности. Пинч-метод позволяет решать конкретные проектные задачи по оптимизации параметров теплоэнергетических объектов. В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. В работе предлагается проводить пинч-анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды. В статье приводится эксергетический анализ такого объекта, как прямоточный котел ПП-2650-255 ГМ с помощью пинч-метода. Результаты работы показывают, что для повышения энергоэффективности котла можно изменить площади поверхностей нагрева экономайзера и воздухоподогревателя. Таким образом, эксергетический пинч-анализ является эффективным методом для повышения энергоэффективности теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: энергоэффективность; эксергия; эксергетический анализ; тепловой баланс; эксергетический баланс; пинч-анализ; методы термодинамического анализа; прямоточный котел; эксергетический пинч-анализ; экономайзер; воздухоподогреватель.

Для цитирования: Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019.Т.21.№4. С. 58-65.doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-58-65.

EXERGY ANALYSIS OF THE BOILER USING THE PINCH METHOD

E.A. Yushkova, V.A. Lebedev

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: This article will help to consider the problem of thermodynamic optimization of heat power equipment. Solving this issue will allow to increase the energy efficiency of thermal systems by reducing the cost of energy resources. There is a large number of methods for studying power plants, and we will combine two of them: the exergy method and the pinch method. Exergy analysis of thermal systems shows quantitative and qualitative characteristics of efficiency. The pinch method allows us to solve specific design problems to optimize the parameters of heat power facilities. The pinch analysis is based on enthalpy, which does not take into account the heat potential. We propose to conduct a pinch analysis of thermal energy sources using exergy, which can better assess the potential of heat fluxes and show the dependence of the energy of heat fluxes on the ambient temperature. The article provides an exergy analysis of a direct-flow boiler PP-2650-255 GM using the pinch method. The results of our work show that in order to increase the energy efficiency of the boiler, it is possible to change the area of the heating surfaces of the economizer and air heater. Thus, exergy pinch analysis is an effective method for increasing the energy efficiency of heat power equipment.

Keywords: energy efficiency; exergy; exergy analysis; heat balance; exergy balance; pinch analysis; methods of thermodynamic analysis; direct-flow boiler; exergy pinch analysis; economizer; air heater.

For citation: Yushkova EA, Lebedev VA. Exergy analysis of the boiler using the pinch method *Power engineering: research, equipment, technology*.2019; 21(4):58-65. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-58-65.

Введение и литературный обзор

На данный момент для исследования энергетических установок на энергоэффективность чаще всего используют энтальпийный метод. Энтальпийный метод позволяет приблизительно проанализировать энергетические характеристики и энергетические возможности термодинамической системы.

Энтальпийный метод не позволяет определить качественную сторону энергии, то есть вопросы о превращениях одних форм энергии в другие. Таким образом энтальпийный метод не дает полный ответ на вопрос о практической возможности получения, преобразования и использования энергий [1].

Также в современной энергетике для определения энергоэффективности системы используют понятие КПД, который прямо пропорционален полезному эффекту и обратно пропорционален затрачиваемой энергии. Получается, что для холодильных установок КПД может достигать значений более 100 %. Для тепловых насосов КПД может быть 300-500 %. Но КПД не может превышать 100 %, следовательно, в данном методе есть неучтенные моменты.

Мартынов А.В. в своей статье предлагает такой КПД называть целевым коэффициентом. Целевые коэффициенты не показывают реальную эффективность установок и систем, так как целевые коэффициенты включают в себя различные виды энергии, такие как работа, электроэнергия, тепло. Нельзя с энергией разных видов, производить алгебраические, арифметические и другие действия [2].

Для определения эффективности теплотехнических систем более целесообразно применять методы, основанные на совместном использовании первого и второго законов термодинамики [3].

Метод, включающий в себя оба принципа термодинамики, называют термодинамическим. Он основан на том, что совершенство любого реального процесса должно оцениваться по степени его отклонения от обратимого процесса. Имеется две разновидности этого метода: эксергетический метод (метод потоков эксергии), энтропийный метод (метод вычитания эксергетических потерь).

Эксергия дает возможность оценить качественную сторону тепловой энергии, т. е. она представляет собой особую универсальную меру энергетических ресурсов.

Одинаковое количество теплоты, например, $Q = 839$ кДж, может быть получено при температуре теплоносителя 50 С и 90 С. Однако ясно, что для практического использования теплоноситель, имеющий более высокую температуру, обладает большей ценностью, чем низкотемпературный теплоноситель. Данный факт подтверждает эксергетический анализ [4]. Посмотрим эксергетический баланс котла на рис. 1.

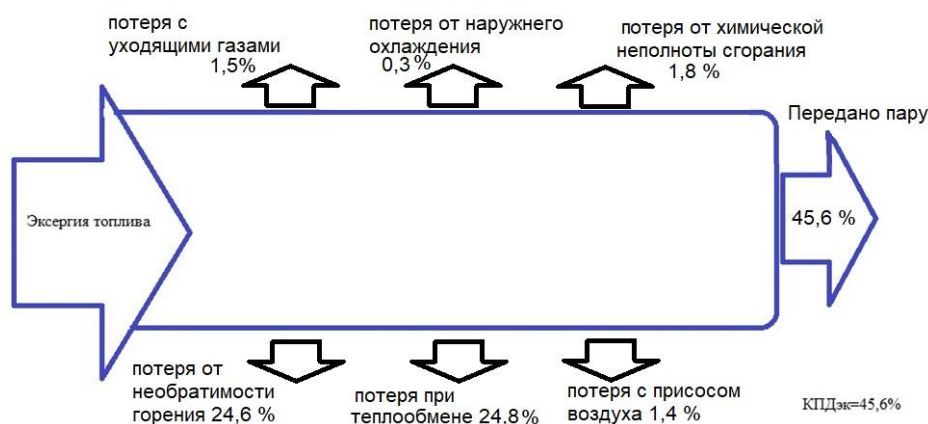


Рис. 1. Эксергетический баланс котла

Сумма коэффициентов от необратимого горения, теплообмена и присосов воздуха составляет 50,8 %, что в тепловом балансе котла даже не учитывается.

При тепловом балансе котельного агрегата КПД брутто =94 %, что намного больше, чем показывает эксергетический КПД: 45,6 %. Многие современные ученые подтверждают данный факт [5].

В области эксергетического анализа проведен литературный обзор, следующих авторов: Д.П. Гохштейна, В.М. Бродянского, Я. Шаргута, Р. Петелы, Б.С. Сажина, А.П. Булекова, А.И. Андрущенко, Я.М. Рубинштейна, М.И. Щепетильникова, и др. В данных работах изложены теоретические основы эксергетического анализа. В последнее время многие исследователи сосредоточили свое внимание на эксергетическом анализе тепловых электростанций для оптимизации качества энергии.

Также Богданов А.Б. в статье [6] рассказывает о важности определения качества энергии: «Впервые в теплоэнергетике и российской экономике энергетике применение понятий ЭКСЕРГИЯ и АНЕРГИЯ позволяет производить классификацию качества рыночного товара: тепловой и электрической энергии, в зависимости от потребности в первичном топливе -энергоемкости. Показано, что энергоемкость для производства равного количества энергии отличается в 2-7 и более раз, в зависимости от вида и технологии ее производства энергии».

Промышленный сектор (нефтехимические, химические и металлургические процессы, системы отопления и охлаждения и т. Д.) Является наиболее сложным для определения общих значений эффективности и эффективности из-за большого разнообразия использования энергии. Методы эксергии используются во многих отраслях промышленности, поскольку они предоставляют мощные инструменты для анализа, оценки, проектирования, улучшения и оптимизации систем и процессов [7].

Эксергетический метод стал известным в 1851–1854 гг. и получил широкое применение в различных отраслях промышленности, где он успешно применяется в 21 веке [8].

Эксергия определяется следующей формулой:

$$Ex = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1)$$

где T_0 – температура окружающей среды, в которую происходит сток теплоты, T – температура, при которой происходит передача теплоты Q [9].

Цацаронис и Мунг-Хо [10] были первыми, кто разработал концепции предотвратимого и неизбежного разрушения эксергии, которые были использованы для определения потенциала улучшения термодинамических характеристик и экономической эффективности системы.

Основы в области интеграции тепловых процессов и пинч-анализа изложены в работах Б. Линнхофа, Й. Клемеша, Л.Л. Товажнянского, Р. Смита, Л.М. Ульева, П.А., Капустенко и др.

Пинч-анализ – методология минимизации энергопотребления процесса посредством термодинамического расчета обоснованных объемов энергопотребления и приближения к ним с помощью оптимизации теплопередачи между процессами [11]. Пинч-метод позволяет достичь минимальных затрат экономических ресурсов за счет уменьшения использования внешних энергоносителей как подводящих энергию, так и отводящих [12].

В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. Мы предлагаем проводить анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды.

В основе пинч-анализа лежит энтальпия, которая не учитывает потенциал тепла. В работе предлагается проводить пинч-анализ источников тепловой энергии при помощи эксергии, которая может более качественно оценить потенциал тепловых потоков и показывает зависимость энергии тепловых потоков от температуры окружающей среды.

Материалы и методы

В теории Пинч-анализа все тепловые потоки можно разделить на две группы. Первая группа – потоки, которые требуют охлаждения. Они называются «Горячие потоки». Так как энтальпия горячих потоков уменьшается при охлаждении потока, данные потоки будут обозначаться вектором, направленным справа налево в координатах температура–энтальпия. Вторая группа – потоки, которые требуют нагревания перед дальнейшей работой с ними. Их называют «Холодные потоки». В координатах температура–энтальпия «Холодные потоки» будут показаны вектором, который направлен слева направо [13].

Изменение энтальпии потока при различных начальных и конечных температурах выражается по формуле

$$dH = C_p \cdot M \cdot dT, \quad (2)$$

где C_p – удельная теплоемкость вещества потока при постоянном давлении, Дж/(кг·К); M – массовый расход вещества потока, кг/с; T – температура, К; H – теплосодержание потока, Вт [14].

Прямоточный котел ПП-2650-255 ГМ применяется на мощных тепловых электростанциях России (Сургутская ГРЭС-2 и т.д.), поэтому возьмем данный котел в качестве примера для эксергетического анализа посредством пинч-метода.

Для анализа возьмем только часть котла: экономайзер и воздухоподогреватель. Схема участка котла изображена на рис.2.

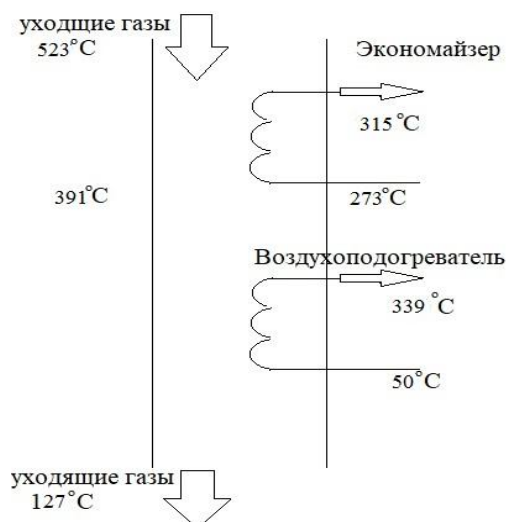


Рис. 2. Схема участка прямоточного котла ПП-2650-255 ГМ

В расчетах и графиках вместо теплосодержания будем использовать эксергию потока. В нашем случае уходящие газы, отдающие тепло экономайзеру, будем называть «Горячий поток 1», уходящие газы, греющие воздухоподогреватель, – «Горячий поток 2». Во вторую группу потоков войдут те потоки, которые необходимо нагреть – «Холодные потоки», в данном котельном агрегате вода экономайзера – это «Холодный поток 1», а нагреваемый воздух воздухоподогревателя – это «Холодный поток 2». Данные для расчета тепловых потоков взяты из пособия [15].

Таблица

Параметры котла

	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Удельная теплоемкость, кДж/кг К	Массовый расход, кг/с	Эксергия, МВт
Холодный поток 1	273	315	4,8	686	-71
Холодный поток 2	50	339	1,02	350	-40
Горячий поток 1	523	391	1,16	700	66
Горячий поток 2	391	127	1,16	700	102

При постоянной температуре потока определить эксергию потоков не сложно и эксергетическая функция теплоты определяется по формуле (1).

Но при изменении температуры технологического потока эксергетическая функция теплоты установки выглядит иначе.

Так, например, нагреваемая вода («Холодный поток 1») в экономайзере имеет начальную температуру и конечную.

Полагая, что

$$Q = c \cdot m \cdot (T_1 - T_2),$$

где c – удельная теплоёмкость потока, Дж/(кг·град); m – массовый расход потока, кг/с;

T_1 – начальная температура потока, °C; T_2 – конечная температура потока, °C.

Тогда уравнение (1) в дифференциальном виде будет выглядеть следующим образом:

$$d(Ex) = c \cdot m \cdot \tau \cdot dT = c \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в интервале температур от T_1 до T_2 , получается зависимость эксергетической функции для количества теплоты, которое необходимо для нагрева теплового потока:

$$\begin{aligned} Ex &= \int_{T_2}^{T_1} c \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT = c \cdot m \cdot [T - T_0 \cdot \ln(T)] \Big|_{T_2}^{T_1} \\ &= c \cdot m \cdot [T_1 - T_0 \cdot \ln(T_1) - T_2 + T_0 \cdot \ln(T_2)] \\ &= c \cdot m \cdot [T_1 - T_2 - T_0 \cdot (\ln(T_1) - \ln(T_2))] \\ &= c \cdot m \cdot \left[T_1 - T_2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}\right]. \end{aligned}$$

Рассчитаем эксергию для «Холодного потока 1» по формуле (4). Температура окружающей среды, взятая для расчетов, равна 0 °C:

$$Ex = 4,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times ^\circ\text{C}} \cdot 686 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot B \left[546\text{K} - 588\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{546\text{K}}{588\text{K}} \right] = -71\text{МВт}.$$

Данные потоки изобразим в системе координат «эксергия–температура» на рис.3 и рис.4.

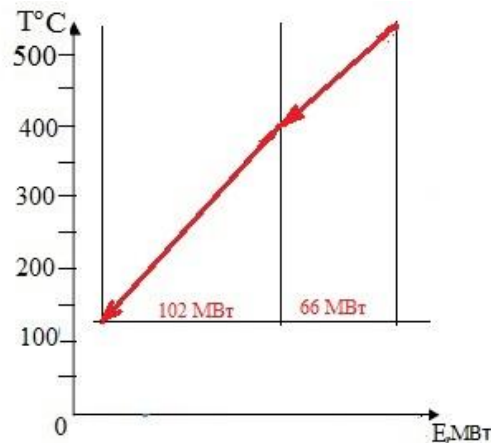


Рис.3. «Горячие потоки» в системе координат «эксергия – температура»

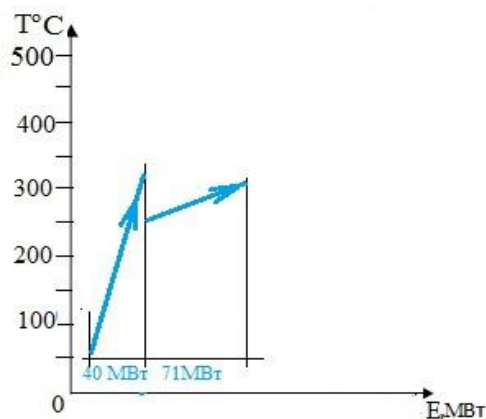


Рис.4. «Холодные потоки» в системе координат «эксергия – температура»

Преобразуем графики методом пинч-анализа(рис.5).

Проекции кривых на ось эксергии перекрывают друг друга. Это значит, что энергия, отводимая от «горячих потоков», может быть использована для нагрева «холодных потоков» посредством рекуперации.

В теории пинч-анализа говорится, что у каждой из составных кривых существует участок, проекция которого на ось энтальпии не перекрывается проекцией второй кривой, то есть холодная составная нуждается во внешнем источнике тепла, а горячая требует дополнительного внешнего охлаждения.

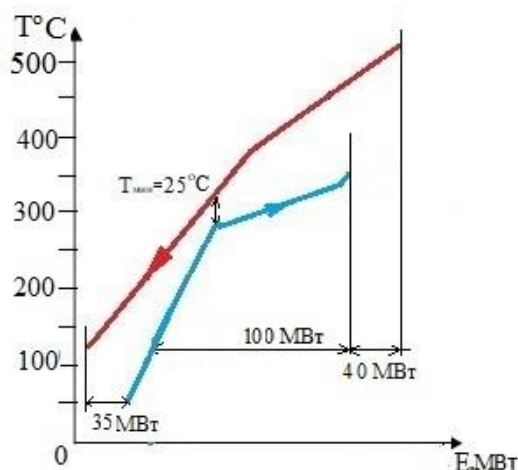


Рис.5. Преобразованные тепловые потоки в системе координат «эксергия – температура»

Результаты и обсуждение

Анализируя график (Рис.5.), можно сделать выводы:

1.«Горячие потоки» перекрывают полностью «холодные потоки», следовательно, холодная составная кривая НЕ нуждается во внешнем источнике тепла (это видно из верхней части графиков). А эксергия еще остается 40 МВт.

2.В нижней части графика видно, что нужно отвести 35 МВт.

3.Предоставляется возможность для передачи эксергии между процессами (рекуперация), 100 МВт эксергии.

А также по теории пинч-анализа необходимо сближать составные кривые (по горизонтали) до минимальной температуры– точки - пинча. Это необходимо для того, чтобы система имела наибольшую рекуперацию энергии, используя при этом минимум внешних источников. В данном анализе пинч-точка – $T_{\min} = 25^{\circ}\text{C}$.

Заключение или выводы

Эксергетический анализ посредством пинч-метода показал, что у котла есть неиспользуемая эксергия, равная 75 МВт (40 МВт в верхней части и 35 МВт в нижней части графика). Для повышения эффективности, исходя из расчетов, мы можем увеличить площадь поверхности нагрева экономайзера, так как график показал 40 МВт неиспользуемой эксергии. Аналогично, можно увеличить поверхность нагрева воздухоподогревателя (35 МВт эксергии), но уже в меньшей степени.

Можно сказать, что необходимо увеличить поверхность нагрева экономайзера больше, чем воздухоподогревателя, так как уходящие газы, греющие воду в экономайзере, имеют больший потенциал тепла 523–391 °C, чем уходящие газы, греющие воздух в воздухоподогревателе, 391–127 °C.

Данный эксергетический метод ориентирован на окружающую среду, т.е. учитывает условия эксплуатации технологического оборудования (температуру окружающей среды) [15].

Литература

1. Агапов Д.А. Структурная и параметрическая оптимизация систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04. СПб, 2017. 312 с.
2. Мартынов А.В. Определение энергетической эффективности аппаратов, установок и систем // Новости теплоснабжения. 2010. №10(122). С. 17–19.

3. Полканов А.С., Лавров С.В. Эксергия и ее основные виды // Студенческая научная конференция за 2016 год. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016. С. 321.
4. Юшкова Е.А., Лебедев В.А. Потоки энергии и эксергии // Молодой ученый. 2017. №12 (146). С. 17–19.
5. Лебедев В.А. Эксергетический метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.435–443.
6. Богданов А. Б. Экономика энергетики ТЭЦ с применением эксергии и анергии. Доступно по: // URL: <http://exergy.narod.ru/Nigre2015-11.PDF>. Ссылка активна на: 31.03.2019.
7. Rosen M. A., Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants on various fuels. // Applied Thermal Engineering. 2003. V.23. pp.643–658.
8. Медведева Г.А., Лабуткин А.Г., Ибрагимова Л.У., Мухаметзянова А.К. Эксергия – путь энергосбережения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», 2016. Т.8. С.1-11. Доступно по: <http://naukovedenie.ru/PDF/59TVN416.pdf>.
9. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия: Пер. польск.; Под ред. В.М. Бродянского. М.: Энергия, 1968. 280 с.
10. Tsatsaronis G., Moung-Ho P. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems // Energy Conversion Management. 2002. V.43. pp.1259–1270.
11. Пинч-анализ. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Доступно по: URL: <https://gisee.ru/articles/sub-methods/778/>. Ссылка активна на: 30.01.2019.
12. Marcelo Castier. Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting, Applied Thermal Engineering. 2019. V.27. N. 8–9. pp.1653–1656.
13. Kemp Ian C. Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for the efficient use of energy 2nd Ed. Elsevier Ltd, 2007. 415 p.
14. Смит Р., Клемеш Й., Тобажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульянов Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000.
15. Yushkova E. A. Exergetic method of analysis of thermal power systems. International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues 2017. V.1. pp. 457–461.

Авторы публикации

Юшкова Екатерина Александровна – аспирант Санкт-Петербургского горного университета. atenoks@mail.ru

Лебедев Владимир Александрович – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и теплоэнергетика» Санкт-Петербургского горного университета. atenoks@mail.ru

References

1. Agapov DA. Structural and parametric optimization of systems of industrial heat engineering and technological equipment: dis. ... Dr. Sciences: 05.14.04. St. Petersburg, 2017. 312 p.
2. Martynov AV. Determination of energy efficiency of devices, installations and systems. *News of heat supply*. 2010;10 (122): 17–19.
3. Polkanov AS., Lavrov SV. Exergy and its main types. *Student Scientific Conference for 2016. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technology*, 2016. P. 321.
4. Yushkova EA, Lebedev VA. Streams of energy and exergy. *Young scientist*. 2017;12 (146):17–19.
5. Lebedev VA. Exergetic method for assessing the energy efficiency of equipment of energy supply systems of enterprises of the mineral resource complex. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016;21:435–443. doi 10.18454 / PMI.2016.3.435.
6. Bogdanov AB. *Economics of power plants with the use of exergy and anergy*. Available at: // URL: <http://exergy.narod.ru/Nigre2015-11.PDF>. Accessed to: 03/31/2019.
7. Rosen MA., Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants on various fuels. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23:643–658.

8. Medvedeva GA., LabutkinAG.,Ibragimova LU., Muhametzyanova AK. Eksergiya – put 'energoberezheniya Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE». 2016;8:1-11. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/59TVN416.pdf> .
9. Shargut I., Petela R. *Exergy*. E.d. V.M. Brodyansk.M: Energy, 1968. (In Polish).
10. Tsatsaronis G., Moungh-Ho P. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. *Energy Conversion Management*.2002;43:1259-1270.
11. Pinch analysis. *State information system in the field of energy conservation and energy efficiency*. Available at:URL: <https://gisec.ru/articles/sub-methods/778/> Accessed 01/30/2019.
12. Marcelo Castier. Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting. *Applied Thermal Engineering*.2019;2:8–9:1653-1656.
13. Kemp Ian C. Pinch analysis and process integration .*A user guide on process integration for the efficient use of energy* (2nd Ed.). Elsevier Ltd, 2007.415 p.
14. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky LL., Kapustenko PA., Uliev LM. *Basics of the integration of thermal processes*. Kharkov: NTU “KhPI”, 2000.
15. Yushkova EA. Exergetic method of analysis of thermal power systems. *International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues*. 2017;1:457-461.

Authors of the publication

Ekaterina A. Yushkova – Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. atenoks@mail.ru.

Vladimir A. Lebedev – Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. atenoks@mail.ru.

Поступила в редакцию

27 мая 2019 г.