

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ТЭЦ

К. т. н., доц. Орлов М. Е.¹,
д. т. н., проф. Шарапов В. И.¹ (ФГБОУ
ВО «УлГТУ»)

АННОТАЦИЯ. Предложена технология работы ТЭЦ, предусматривающая использование конденсата после пикового сетевого подогревателя в дополнительном водо-водяном теплообменнике для нагрева сетевой воды. Построены графики распределения температур теплоносителя после основных сетевых подогревателей, дополнительного водо-водяного теплообменника и пикового сетевого подогревателя. Для традиционной и предложенной технологий работы ТЭЦ построены эксергетические диаграммы и произведен эксергетический анализ термодинамической эффективности их теплоприготовительных установок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эксергия, теплоприготовительные установки ТЭЦ, термодинамическая эффективность, эксергетический КПД.

ABSTRACT. The working technology of combined heat and power plant providing use of condensate after a peak network heater in the additional water-to-water heat exchanger for heating of network water is offered. Temperature schedules of the heat carrier after the main network heaters, the additional water-to-water heat exchanger and a peak network heater are constructed. For the traditional and offered technologies of combined heat and power plant exergetic charts are constructed and the exergetic analysis of thermodynamic effectiveness for their heating installations is made.

KEY WORDS: exergy, heating installations of power plants, thermodynamic efficiency, exergy efficiency coefficient.

Эксергетический метод анализа представляет собой метод термодинамического исследования технических систем как в целом, так и путем разделения их на отдельные составные части с целью получения информации о процессах преобразования энергии в таких системах. В основе этого метода лежит понятие «эксергии», как свойства термодинамической системы или потока, характеризуемого максимальной работой, которая может быть получена внешним приемником энергии при обратимом взаимодействии с окружающей средой до установления полного равновесия [1]. Хотя первые научные работы по применению эксергетического метода анализа появились во второй половине XIX в., широкое распространение во всех отраслях преобразования и потребления энергии этот метод получил только во второй половине XX в. Существенный вклад в развитие эксергетического метода термодинамического анализа внесли Ж. Гюи, А. Стодола, Ф. Бошнякович, Я. Шаргут, Д. П. Гохштейн, В. М. Бродянский, А. И. Андриющенко и другие.

Для нагрева сетевой воды на ТЭЦ имеются базовые и пиковые источники теплоты. Базовая тепловая нагрузка обеспечивается в основных сетевых подогревателях теплофикационных турбин. Чаще всего пиковая тепловая нагрузка на ТЭЦ покрывается пиковыми водогрейными котлами (рис. 1а), работа которых сопряжена с рядом проблем, обусловленных как их

конструктивными особенностями, так и повышенными требованиями к качеству подпиточной и сетевой воды. Альтернативой пиковым водогрейным котлам являются пиковые сетевые подогреватели, работающие от различных источников высокопотенциального пара [2]. На многих промышленно-отопительных ТЭЦ в результате спада или перепрофилирования производства имеются избытки пара производственных отборов турбин. С целью их более эффективного использования, увеличения выработки электроэнергии на тепловом потреблении и повышения эффективности ТЭЦ разработана усовершенствованная технология работы ТЭЦ с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным подогревателем (рис. 1б) [3, 4].

Сущность этой технологии заключается в том, что пиковая тепловая нагрузка полностью обеспечивается в пиковых сетевых подогревателях и дополнительном водо-водяном теплообменнике. Конденсатом, образующимся в пиковом сетевом подогревателе, подключенном к производственному отбору пара, нагревают сетевую воду после основных сетевых подогревателей и перед пиковым подогревателем в дополнительном водо-водяном теплообменнике. После этого охлажденный конденсат направляют в трубопровод основного конденсата турбины между вторым и третьим по ходу основного конденсата регенеративными подогревателями низкого давления (на рис. 1 не показаны), благодаря чему обеспечива-

¹ 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

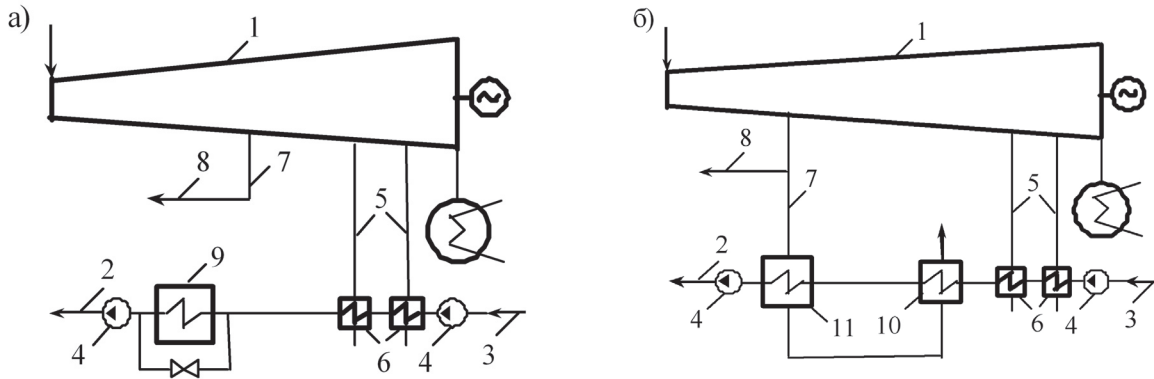


Рис. 1. Схемы ТЭЦ с пиковым водогрейным котлом (а) и с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным теплообменником (б): 1 — теплофикационная турбина; 2, 3 — подающий и обратный трубопроводы теплосети; 4 — сетевой насос; 5 — теплофикационные отборы пара; 6 — основные сетевые подогреватели; 7 — производственный отбор пара; 8 — паропровод технологического пара; 9 — пиковый водогрейный котел; 10 — дополнительный водо-водяной подогреватель; 11 — пиковый сетевой подогреватель.

ется дополнительная выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

Распределение температур теплоносителя после основных сетевых подогревателей, дополнительного водо-водяного теплообменника и пикового сетевого подогревателя показано на рис. 2.

Из графика видно, что основной подогрев сетевой воды (88–90%) осуществляется в пиковом сетевом подогревателе, а доля нагрева в дополнительном водо-водяном теплообменнике достигает 10–12%.

Для сравнения энергетической эффективности процессов нагрева и транспорта сетевой воды на ТЭЦ по схемам на рис. 1 применим эксергетический метод. В [1] отмечается, что эксергетический метод позволяет выявить наиболее выгодный путь повышения совершенства как всего исследуемого процесса, так и отдельных его этапов. Преимуществом эксергетического метода является то, что он учитывает практическую ценность различных видов энергии, затрачиваемых в процессе производства той или иной продукции, отпускаемой потребителям. В рассматриваемом случае потребителю отпускается тепловая энергия с нагретой сетевой водой, поэтому потоки эксергии будем оценивать по удельным величинам, приходящимся на 1 м³ сетевой воды.

Удельные затраты эксергии E_1 , кДж/м³, на ТЭЦ (рис. 1а) на подготовку 1 м³ сетевой воды, отпускаемой потребителям, определяются в виде выражения

$$E_1 = E_1^{ПБК} + E_1^{ОСП} + E_1^{\text{Э}} + E_{\text{вх1}}^{CB} - E_{\text{вых1}}^{ОСП} - E_{\text{вых1}}^{CB}, \quad (1)$$

где $E_1^{ПБК}$ — эксергия природного газа, используемого для подогрева сетевой воды в пиковом водогрейном котле, кДж/м³; $E_{\text{вх1}}^{ОСП}$ — эксергия, подведенная в виде теплоты на подогрев сетевой воды в основных сетевых подогревателях теплофикационных турбин, кДж/м³; $E_{\text{вых1}}^{ОСП}$ — потери эксергии в виде теплоты с потоком конденсата после основных сетевых подогревателей теплофикационных турбин, кДж/м³; $E_1^{\text{Э}}$ — эксергия, за-

траченная на транспорт сетевой воды в виде электроэнергии, кДж/м³; $E_{\text{вх1}}^{CB}$, $E_{\text{вых1}}^{CB}$ — эксергии потоков сетевой воды на входе и выходе из теплоприготовительной установки, кДж/м³.

Эксергия газообразного топлива на подогрев 1 м³ сетевой воды определяются по приближенной формуле [5]

$$E_1^{ПБК} = 0,95 Q_p^{\text{г}} \cdot b_{\text{г}}, \quad (2)$$

где $Q_p^{\text{г}}$ — высшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; $b_{\text{г}}$ — удельный расход природного газа, необходимый для подогрева 1 м³ сетевой воды, м³/м³.

При сжигании газа Уренгойского месторождения для подогрева 1 м³ сетевой воды в пиковом водогрейном котле со 110 до 150°С затраты эксергии $E_1^{ПБК} = 183\,403$ кДж/м³.

Эксергия, поступающая с греющим паром для подогрева 1 м³ сетевой воды в основных сетевых подогревателях теплофикационных турбин, рассчитывается по формуле

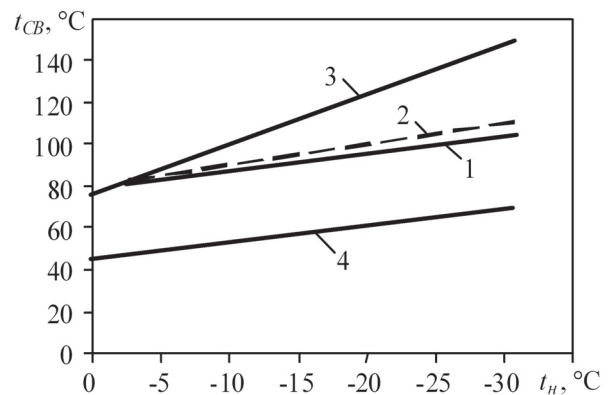


Рис. 2. Изменение температуры сетевой воды в пиковый период: 1 — в основных сетевых подогревателях; 2 — в дополнительном водо-водяном теплообменнике; 3 — в пиковом сетевом подогревателе; 4 — в обратной магистрали теплосети.

$$E_{ex1}^{ОСП} = D[h_n - h_o - T_o(s_n - s_o)], \quad (3)$$

где D — количество пара из отборов турбин, используемого для подогрева 1 м^3 сетевой воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; h_n, h_o — энтальпии пара и окружающей среды, $\text{кДж}/\text{кг}$; s_n, s_o — энтропии пара и окружающей среды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T_o — абсолютная температура окружающей среды, К .

В качестве температуры окружающей среды T_o принимаем температуру исходной воды в зимний период 278°К , при этом условии в основных сетевых подогревателях на подогрев 1 м^3 сетевой воды расходуется эксергия в количестве $E_{ex1}^{ОСП} = 53\,699,0 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

Затраты эксергии на транспорт 1 м^3 теплоносителя оцениваются по формуле

$$E_1^\varnothing = p_{сн} \cdot V_{св} / \eta_{сн}, \quad (4)$$

где $p_{сн}$ — напор сетевого насоса, кПа ; $V_{св}$ — масса сетевой воды, проходящей через насос, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\eta_{сн}$ — КПД сетевого насоса.

При транспорте 1 м^3 сетевой воды насосом с напором 2400 кПа затраты эксергии $E_1^\varnothing = 3428,6 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

В общем случае эксергия потока сетевой воды рассчитывается по формуле

$$E^B = G[h_g - h_o - T_o(s_g - s_o)], \quad (5)$$

где G — масса воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; h_g, h_o — энтальпии воды и окружающей среды, $\text{Дж}/\text{кг}$; s_g, s_o — энтропии воды и окружающей среды, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Определенные по формуле (5) значения эксергий потоков сетевой воды на входе и на выходе из теплоприготовительной установки ТЭЦ при подогреве 1 м^3 воды с 70 до 150°С составляют $E_{ex1}^{CB} = 27\,595,7$ и $E_{вых1}^{CB} = 118\,535,6 \text{ кДж}/\text{м}^3$. По формуле (5) при подстановке в нее массы конденсата определяется эксергия потока конденсата, выходящего из сетевого подогревателя, $E_{вых1}^{ОСП} = 3\,032,5 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

Общие затраты эксергии, рассчитанные по формуле (1), составят $E_1 = 146\,558,2 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

Эксергетическая диаграмма потоков эксергии для ТЭЦ с последовательным включением основных сетевых подогревателей и пиковых водогрейных котлов показана на рис. 3а.

Произведем эксергетический анализ теплоприготовительной установки ТЭЦ с последовательным вклю-

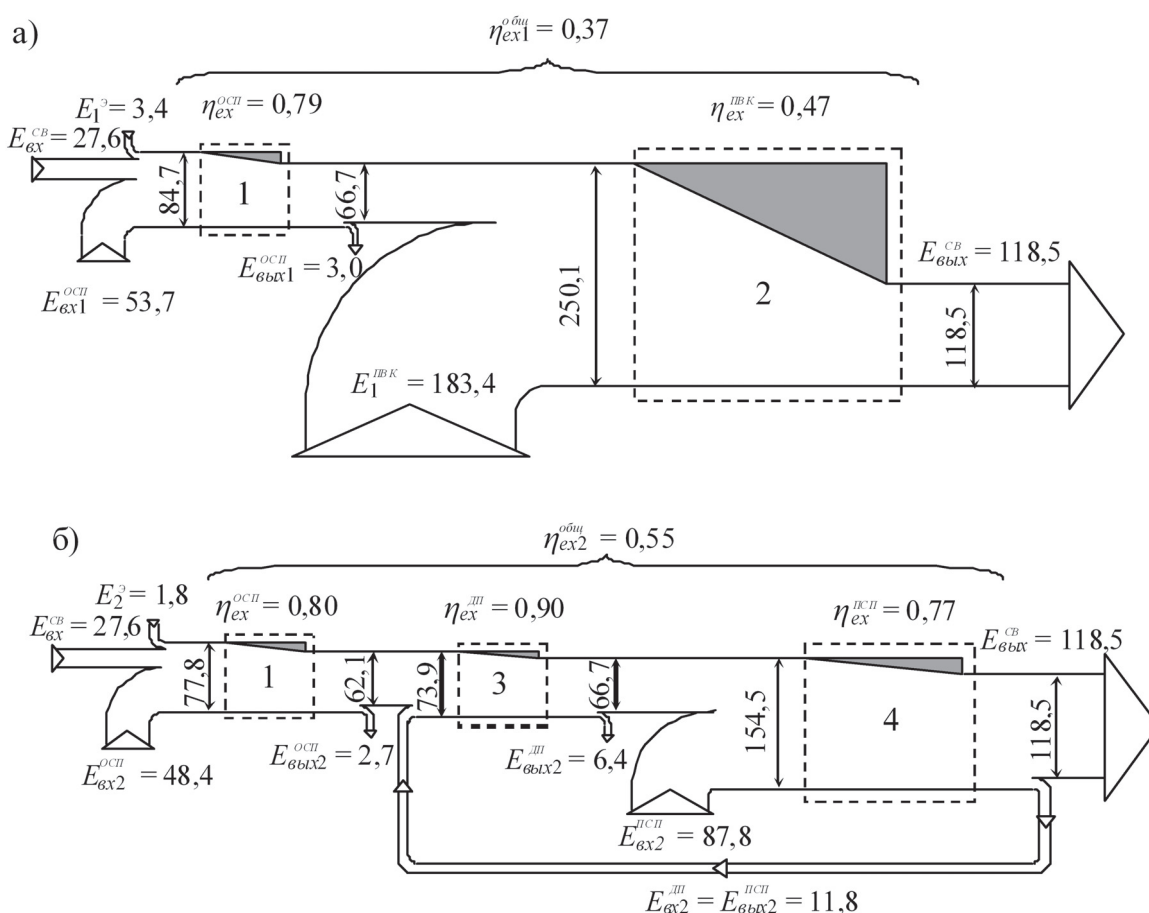


Рис. 3. Эксергетические диаграммы теплоприготовительных установок сетевой воды на ТЭЦ с последовательным включением основных сетевых подогревателей и пиковых водогрейных котлов (а) и на ТЭЦ с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным теплообменником (б): 1 — основные сетевые подогреватели; 2 — пиковый водогрейный котел; 3 — дополнительный водо-водяной подогреватель; 4 — пиковый сетевой подогреватель (значения потоков эксергии на диаграмме указаны в $\text{МДж}/\text{м}^3$).

чением дополнительного водо-водяного теплообменника и пикового сетевого подогревателя, рис. 16. Для второй схемы удельные затраты эксергии E_2 , кДж/м³, на подготовку 1 м³ сетевой воды, отпускаемой потребителям, определяются в виде суммы

$$E_2 = E_{\text{вх}2}^{\text{ПСП}} + E_{\text{вх}2}^{\text{ДП}} + E_{\text{вх}2}^{\text{ОСП}} + E_2^{\text{Э}} + E_{\text{вх}2}^{\text{СВ}} - E_{\text{вых}2}^{\text{ОСП}} - E_{\text{вых}2}^{\text{ПСП}} - E_{\text{вых}2}^{\text{ДП}} - E_{\text{вых}2}^{\text{СВ}}, \quad (6)$$

где $E_{\text{вх}2}^{\text{ПСП}}$, $E_{\text{вых}2}^{\text{ПСП}}$ — эксергия, подведенная и отведенная с теплотой из пиковых сетевых подогревателей теплофикационных турбин, кДж/м³; $E_{\text{вх}2}^{\text{ДП}}$, $E_{\text{вых}2}^{\text{ДП}}$ — эксергия, подведенная и отведенная с теплотой из дополнительного водо-водяного теплообменника, кДж/м³.

При одинаковых температурах прямой и обратной сетевой воды величины $E_{\text{вх}2}^{\text{СВ}} = E_{\text{вх}1}^{\text{СВ}}$, $E_{\text{вых}2}^{\text{СВ}} = E_{\text{вых}1}^{\text{СВ}}$. Величины эксергии на входе в пиковый и основной подогреватели, определенные по формулам (3) и (5) при подстановке в них значений количества и параметров пара соответствующих отборов турбин ТЭЦ равны, соответственно, $E_{\text{вх}2}^{\text{ПСП}} = 87775,8$; $E_{\text{вх}2}^{\text{ДП}} = 11838,5$; $E_{\text{вх}2}^{\text{ОСП}} = 48376,3$; $E_{\text{вх}2}^{\text{ОСП}} = 2749,5$ кДж/м³. Величина эксергии конденсата на входе в дополнительный водо-водяной теплообменник $E_{\text{вх}2}^{\text{ДП}} = E_{\text{вых}2}^{\text{ПСП}} = 11838,5$ кДж/м³. Величина эксергии охлажденного конденсата на выходе из дополнительного водо-водяного теплообменника, определенная по формуле (5), $E_{\text{вх}2}^{\text{ДП}} = 6421,2$ кДж/м³.

Суммарное гидравлическое сопротивление пикового сетевого подогревателя и дополнительного теплообменника меньше, чем гидравлическое сопротивление пикового водогрейного котла, поэтому необходимый напор сетевого насоса будет меньше. При величине напора 1230 кПа затраты эксергии на транспорт 1 м³ теплоносителя, рассчитанные по формуле (4), составляют $E_2^{\text{Э}} = 1757,1$ кДж/м³.

Общие затраты эксергии, рассчитанные по формуле (6) для теплоприготовительной установки ТЭЦ, изображенной на рис. 16, составят $E_2 = 37798,6$ кДж/м³.

Эксергетическая диаграмма для ТЭЦ с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным теплообменником показана на рис. 36.

Разность между удельными затратами эксергии в теплоприготовительных установках ТЭЦ, изображенных на рис. 1а и 1б, составляет $E_1 - E_2 = 108\,759,6$ кДж/м³.

При оценке эффективности различных процессов и установок с помощью эксергетического метода термодинамического анализа основным показателем степени термодинамического совершенства является эксергетический коэффициент полезного действия η_{ex} , в общем случае определяемый по формуле

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\sum E''}{\sum E'} = 1 - \frac{\sum E_{\text{ном}}}{\sum E'}, \quad (7)$$

где $\sum E'$ — сумма всех потоков эксергии, поступающих в систему, кДж/м³; $\sum E''$ — сумма всех потоков эксергии,

выходящих из системы, кДж/м³; $\sum E_{\text{ном}}$ — сумма потерь эксергии в системе, кДж/м³.

Рассчитанные по формуле (7) величины эксергетических КПД для отдельных ступеней теплоприготовительных установок представлены на эксергетической диаграмме (рис. 3).

Для относительно простых систем с последовательным расположением составных частей, к которым относятся теплоприготовительные установки ТЭЦ, эксергетический КПД, согласно пособию [1], определяется по формуле:

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{общ}} = \prod_{i=1}^m \eta_{\text{ex}i}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{ex}i}$ — эксергетический КПД отдельной ступени; $i = 1 \dots m$ — число ступеней в системе.

Эксергетические КПД, рассчитанные по формуле (8) составляют: для ТЭЦ с традиционным последовательным включением основных сетевых подогревателей и пиковых водогрейных котлов (рис. 1а) $\eta_{\text{ex}1}^{\text{общ}} = 0,37$; для ТЭЦ с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным теплообменником (рис. 1б) $\eta_{\text{ex}2}^{\text{общ}} = 0,55$, т. е. на 18% больше, чем для ТЭЦ с традиционной технологией обеспечения пиковой тепловой мощности.

Такая существенная разница между удельными затратами эксергии и эксергетическими КПД связана, главным образом, с большими потерями эксергии топлива в пиковом водогрейном котле в первой схеме (рис. 3а). Во второй схеме большая часть эксергии топлива расходуется на получение пара в энергетических котлах и выработку электроэнергии в турбине, на подогрев сетевой воды затрачивается лишь эксергия потока отработавшего пара, причем эксергия потока конденсата из пикового сетевого подогревателя полезно используется в дополнительном водо-водяном теплообменнике (рис. 3б).

Таким образом, предложенная технология работы ТЭЦ с пиковым сетевым подогревателем и дополнительным водо-водяным теплообменником является более термодинамически совершенной по сравнению с традиционной технологией. Кроме того, использование пиковых подогревателей вместо водогрейных котлов позволяет повысить эффективность ТЭЦ за счет исключения частых повреждений источников пиковой тепловой мощности и увеличения выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Выводы

1. Предложена технология работы ТЭЦ с пиковыми сетевыми подогревателями и дополнительным водо-водяным теплообменником, в котором конденсатом после пикового сетевого подогревателя нагревают сетевую воду, охлажденный конденсат после дополнительного теплообменника направляют в трубопровод основного конденсата турбины между вторым и третьим по ходу основного конденсата регенеративными

подогревателями низкого давления, благодаря чему обеспечивается дополнительная выработка электроэнергии на тепловом потреблении.

2. Построены графики распределения температур теплоносителя после основных сетевых подогревателей, дополнительного водо-водяного теплообменника и пикового сетевого подогревателя, из которых видно, что в пиковом режиме основной подогрев сетевой воды (88–90%) осуществляется в пиковом сетевом подогревателе, а доля нагрева в дополнительном водо-водяном теплообменнике составляет 10–12%.

3. Произведен сравнительный эксергетический анализ термодинамической эффективности теплоприготовительных установок для традиционной ТЭЦ с пиковыми водогрейными котлами и для предложенной технологии с пиковым сетевым подогревателем и дополнительным водо-водяным теплообменником. В результате анализа построены эксергетические диаграммы теплоприготовительных установок ТЭЦ и рассчитаны эксергетические КПД для традиционной схемы $\eta_{ex1}^{общ} = 0,37$ и для предложенной $\eta_{ex2}^{общ} = 0,55$. Эксергетический КПД для предложенной схемы оказался

на 18% больше, что говорит о ее более высоком термодинамическом совершенстве.

Литература

1. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / Под ред. В. М. Бродянского. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Шарапов В. И., Орлов М. Е. Технологии обеспечения пиковой нагрузки систем теплоснабжения. М.: Изд-во «Новости теплоснабжения». 2006.
3. Pat. №2164606 RU. Патент на изобретение «Тепловая электрическая станция» / В. И. Шарапов, П. В. Ротов, М. Е. Орлов // Бюллетень изобретений. 2001. №9.
4. Pat. №2166645 RU. Патент на изобретение «Способ работы тепловой электрической станции» / В. И. Шарапов, П. В. Ротов, М. Е. Орлов // Бюллетень изобретений. 2001. Бюл. №13.
5. Андрущенко А. И. Методика расчета эксергетической эффективности технологических процессов и производств. Методические указания к изучению курса «Методы термодинамического анализа установок и систем». — Саратов: Изд-во СПИ, 1989.

