

УДК 519.6

Вычислительные методы определения удельных расходов условного топлива ТЭЦ на отпущенную электрическую и тепловую энергию в режиме комбинированной выработки

Чучуева И. А.^{1,*}

[*chuchueva@mbureau.ru](mailto:chuchueva@mbureau.ru)

¹Математическое бюро, Москва, Россия

*Посвящается Марии Александровой,
прима-балерине Большого театра, народной артистке России*

В работе обсуждается задача расчета удельных расходов условного топлива ТЭЦ при комбинированном производстве тепловой и электрической энергий. Выполнен обзор методов, наиболее часто применяемых в России и в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла. Разработан новый термодинамический метод расчета удельных расходов условного топлива при комбинированном производстве, основанный на использовании линеаризованной расходной характеристики паровой турбины. Проведено сравнение рассмотренных методов расчета удельных расходов условного топлива на основании сформулированных принципов и результатов расчетов, выявлены наиболее эффективные методы.

Автор благодарит д.ф.-м.н., профессора МГТУ им. Н.Э. Баумана А.П. Карпенко за помощь в редактировании рукописи.

Ключевые слова: комбинированная выработка электроэнергии и тепла, ТЭЦ, удельный расход условного топлива, линеаризованная расходная характеристика паровой турбины

Введение

Теплоэлектроцентральный (ТЭЦ) комбинированно производит несколько продуктов: электроэнергию, промышленный пар, тепло в виде горячей воды. Комбинированное производство тепловой и электрической энергий экономичнее раздельного на 37% по оценке [1], на 25% – по оценке [2], на 30% – по оценке [3]. Величину снижения расхода топлива и, как следствие, затрат на топливо при комбинированном производстве в сравнении с раздельным производством называют *экономией (benefit)* [2, 4].

Задача расчета удельных расходов условного топлива на производство продуктов ТЭЦ состоит в определении объема сжигаемого топлива на единицу каждого из продуктов. Целями решения данной задачи являются

- 1) определение технической эффективности режимов работы ТЭЦ,
- 2) повышение конкурентоспособности ТЭЦ на рынках электроэнергии и тепла.

Для достижения первой цели разработан ряд *термодинамических методов* расчета удельных расходов условного топлива [2, 4]; для достижения второй цели – ряд *экономических методов* [1–3].

В условиях регулируемых экономических отношений в сфере электро- и теплоэнергетики установка тарифов на тепло и электроэнергию жестко привязана к оценкам технической эффективности ТЭЦ [2–4]. В условиях развитых рыночных отношений ценообразование не имеет жесткой связи с этими оценками. Контроль технической эффективности режимов работы станции является внутренней проблемой ТЭЦ. Уровень конкурентоспособности ТЭЦ определяет ее прибыль при работе на рынках электроэнергии и тепла и оказывает влияние на рыночные цены [1–3].

В России, несмотря на десятилетнее развитие рыночных отношений в сфере электроэнергетики и начало работы *Оптового рынка электроэнергии и мощности* (ОРЭМ) в 2006 году, формирование ценовых предложений ТЭЦ на рынок по-прежнему жестко связано с оценками технической эффективности [5]. Для определения этой эффективности в нашей стране широко применяют наименее корректный термодинамический метод расчета удельных расходов условного топлива – *физический метод* [3, 4]. Экономические методы расчета удельных расходов условного топлива для формирования рыночной стратегии при работе на ОРЭМ не применяют [5].

Цели работы заключаются в следующем.

- а) Обзор наиболее часто применяемых в России, а также в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла методов расчета удельных расходов условного топлива.
- б) Разработка нового термодинамического метода расчета удельных расходов условного топлива, основанного на представлении расходной характеристики паровой турбины в виде линеаризованной расходной характеристики.
- в) Сравнение эффективности термодинамических и экономических методов на основе сформулированных принципов и численных расчетов.

В обзорной части работы рассмотрены пять наиболее часто применяемых термодинамических методов: *физический метод*; *эксергетический метод*; *метод пропорционального распределения от компании ОРГРЭС*; *метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию*; *метод, учитывающий тепловую ценность пара* [1–4]. А также пять наиболее часто применяемых экономических методов: *энергетический метод*; *метод альтернативного производства тепла*; *метод альтернативного производства электроэнергии*; *метод разнесения экономии*; *метод разнесения экономии и риска* [1, 2, 6, 7].

Разработанный метод расчета удельных расходов условного топлива, основанный на использовании линеаризованной расходной характеристики паровой турбины, позволяет

учесть *неэквивалентность энергий* продуктов ТЭЦ [4, 8]. Другим достоинством данного метода является простота вычислений и небольшое число исходных данных.

Сформулированы принципы сравнения эффективности двух указанных групп методов. Проведены расчеты удельных расходов условного топлива каждым из этих методов. Результаты сравнения эффективности термодинамических и экономических методов показывают, что наиболее эффективными термодинамическими методами являются эксергетический метод и метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию. Наиболее эффективными экономическими методами являются метод разнесения экономии и риска и метод альтернативного производства тепла.

Важным выводом работы является заключение о том, что официальный метод расчета удельных расходов условного топлива в России – «физический» метод – является наименее эффективным термодинамическим методом. Широкое применение данного метода и его жесткая связь с ценообразованием в условиях функционирования ОРЭМ тормозит развитие рыночных отношений в сфере электро- и теплоэнергетики.

Работа имеет следующую структуру. В первом разделе предложена постановка задачи расчета удельных расходов условного топлива. Второй раздел посвящен обзору наиболее часто применяемых методов расчета. Обзор состоит из двух частей: в первой части рассмотрены методы, применяемые в России, во второй – методы, применяемые в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла. Третий раздел содержит описание разработанного метода расчета удельных расходов условного топлива, основанного на использовании линеаризованной расходной характеристики паровой турбины. В четвертом разделе сформулированы принципы сравнения эффективности термодинамических и экономических методов, проведено сравнение методов на основании указанных принципов и результатов расчетов.

1. Постановка задачи

Сжигая топливо, ТЭЦ комбинированно производит несколько продуктов, основными из которых являются электроэнергия, промышленный пар и тепло. Часть произведенных продуктов ТЭЦ потребляет на собственные нужды. *Отпуском* продуктов ТЭЦ называют производство за вычетом потребления на собственные нужды [4, 5]. Рассмотрим подробнее основные продукты ТЭЦ.

- *Электроэнергия N* . Объем выработки электроэнергии ТЭЦ определяется рыночным механизмом на основании поданных данной ТЭЦ заявок [5]. В соответствии с правилами ОРЭМ формирование *почасовых ценовых заявок* на планирование выработки электроэнергии на *рынке на сутки вперед* специалисты ТЭЦ производят с учетом величины удельного расхода условного топлива на отпуск 1 МВт·ч [5, 9]. Оплата произведенной электроэнергии осуществляется в соответствии с правилами ОРЭМ [5]. Объем электроэнергии, потребляемый на собственные нужды N^{CH} , покупают на рынке [5].
- *Промышленный пар $Q_{п}$* . Пар давлением 6–35 атм и температурой 150–250⁰С потребляют, как правило, предприятия для технологических нужд. График отпуска

промышленного пара является для ТЭЦ обязательным. Оплату отпущенного промышленного пара производят по цене договора между ТЭЦ и предприятием. Объем собственных нужд по промышленному пару обозначим Q_{Π}^{CH} .

- Тепло в виде горячей воды Q_{T} . Воду с температурой 50–120⁰С потребляют население и предприятия. График нагрева воды рассчитывают при помощи температурного графика [10]: чем ниже температура окружающей среды, тем выше тепловая нагрузка ТЭЦ. График производства тепла является обязательным для ТЭЦ. Оплату отпущенного тепла производят по тарифу, установленному на основании среднемесячных значений удельного расхода условного топлива на отпуск 1 Гкал. Тариф утверждается Федеральной службой по тарифам на заданный период времени [11]. Объем собственных нужд ТЭЦ по горячей воде обозначим Q_{T}^{CH} .

Для производства указанных продуктов ТЭЦ используют различные виды топлива: природный газ, доменный газ, мазут, уголь, биомассу и т. п. [1]. В России с целью упрощения расчетов расходы различных видов топлива приводят к расходу *условного топлива* [4]. *Теплотворная способность* условного топлива является постоянной и равной 7000 ккал/кг [12].

Производство продуктов N , Q_{Π} , Q_{T} рассматриваем на некотором интервале времени. Этот интервал зависит от целей расчета: для расчета удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии следует брать интервал времени, равный 1 часу; для расчета удельного расхода условного топлива на отпуск тепла – 1 месяцу.

В рамках работы собственные нужды ТЭЦ по электроэнергии N^{CH} относим на производство электроэнергии N , собственные нужды по промышленному пару Q_{Π}^{CH} – на производство промышленного пара Q_{Π} , собственные нужды по горячей воде Q_{T}^{CH} – на производство горячей воды Q_{T} .

При расчете удельного расхода условного топлива на отпуск единицы продукции при комбинированном производстве ставится задача – определить следующие величины:

- удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии

$$b_N = \frac{B_N}{N - N^{\text{CH}}}; \quad (1)$$

- удельный расход условного топлива на отпуск промышленного пара

$$b_{\Pi} = \frac{B_{\Pi}}{Q_{\Pi} - Q_{\Pi}^{\text{CH}}}; \quad (2)$$

- удельный расход условного топлива на отпуск тепла

$$b_{\text{T}} = \frac{B_{\text{T}}}{Q_{\text{T}} - Q_{\text{T}}^{\text{CH}}}. \quad (3)$$

Здесь B_N , B_{Π} , B_{T} – части общего расхода условного топлива B , отнесенные на выработку электроэнергии, промышленного пара, тепла соответственно. При определении значений B_N , B_{Π} , B_{T} должен быть обеспечен топливный баланс:

$$B = B_N + B_{\Pi} + B_{\text{T}}. \quad (4)$$

Основными исходными данными для расчета являются:

- значения общей нагрузки ТЭЦ N , N^{CH} , $Q_{\text{П}}$, $Q_{\text{П}}^{\text{CH}}$, $Q_{\text{Т}}$, $Q_{\text{Т}}^{\text{CH}}$;
- общий расход условного топлива B .

Дополнительные исходные данные зависят от применяемого метода расчета (п. 2).

В качестве единицы измерения для величин общей нагрузки ТЭЦ всюду используем МВт·ч, для расходов условного топлива – т.у.т. Таким образом, удельные расходы условного топлива b_N , $b_{\text{П}}$, $b_{\text{Т}}$ имеют единицу измерения т.у.т./МВт·ч, которые при необходимости могут быть переведены в кг у.т./МВт·ч, г у.т./кВт·ч, г у.т./ГДж, кг/Гкал и ряд других [4, 9].

2. Обзор методов

2.1 Классификация методов

Методы расчета удельных расходов условного топлива при комбинированной выработке разделяют на две группы [1–3, 6]:

- термодинамические;
- экономические.

Целью термодинамических методов является определение технической эффективности режимов работы ТЭЦ. Методы основаны на учете технологических (термодинамических) особенностей комбинированного производства тепловой и электрической энергий [4]. К этим методам относят:

- «физический» (тепловой, балансовый или энтальпийный) метод (п. 2.2.1);
- эксергетический метод (п. 2.2.2, 2.3.1);
- метод пропорционального распределения от компании ОРГРЭС (п. 2.2.3);
- метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию (п. 2.2.4, 2.3.2);
- метод, учитывающий тепловую ценность пара (п. 2.2.5).

Целью экономических методов расчета удельных расходов условного топлива является повышение конкурентоспособности продуктов ТЭЦ на рынках электроэнергии и тепла [2, 3, 6]. Конкурентоспособность ТЭЦ на рынках определяется значением себестоимости ее продуктов: заявленная на рынок себестоимость должна быть ниже рыночной цены [5]. Себестоимость является экономическим показателем, основанным на величине удельного расхода условного топлива. К этим методам относят:

- энергетический метод (п. 2.3.3);
- метод альтернативного производства тепла (п. 2.3.4);
- метод альтернативного производства электроэнергии (п. 2.3.5);
- метод разнесения экономии (п. 2.3.6);
- метод разнесения экономии и риска (п. 2.3.7).

2.2 Методы решения задачи в России

Несмотря на развитие рыночных отношений в сфере электроэнергетики, в России задачу расчета удельных расходов условного топлива решают исключительно термодина-

мическими методами [3, 4, 9, 11]. Результаты таких расчетов используют для определения себестоимости отпуска 1 МВт·ч электроэнергии при формировании заявки на рынок на сутки вперед [5].

2.2.1 «Физический» (тепловой, балансовый или энтальпийный) метод

«Физический» метод расчета удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии, промышленного пара и тепла являлся официальным для России до 1996 года [3]. С 2013 года данный метод снова является официальным для России [9]. Иногда данный метод называют тепловым [9], балансовым [4] или энтальпийным [8].

Дополнительным исходным значением для расчета «физическим» методом является общий расход пара высокого давления Q_0 , МВт·ч.

Согласно «физическому» методу расчет удельных расходов условного топлива производят в два шага.

1) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива на выработку электроэнергии B_N задает выражение

$$B_N = \frac{Q_N}{Q_0} \cdot B,$$

где Q_N – расход пара на выработку электроэнергии, МВт·ч. Величину Q_N вычисляют на основании баланса пара:

$$Q_0 = Q_N + Q_{\Pi} + Q_T. \quad (5)$$

Расход условного топлива на выработку промышленного пара и тепла находят по соответствующим формулам

$$B_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{Q_0} \cdot B,$$

$$B_T = \frac{Q_T}{Q_0} \cdot B.$$

2) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.2.2 Эксергетический метод

Эксергетический метод расчета удельных расходов условного топлива считают наиболее «справедливым» (“fair”) и корректным термодинамическим методом [2, 4, 6]. Понятие *эксергия* (exergy) применяют для оценки *качества различных (неэквивалентных) видов энергий* (quality of different forms of energy) [13]. Метод применяют в странах с развитыми рынками электроэнергии для оценки технической эффективности работы ТЭЦ [2, 6] (п. 2.3.1).

Метод расчета требует ряда дополнительных значений исходных параметров режима работы оборудования ТЭЦ:

- энтальпия и энтропия различных видов пара и их конденсата;
- температура окружающей среды.

Эксергетический метод решения задачи расчета удельных расходов условного топлива каждого продукта ТЭЦ состоит из трех шагов.

1) Определение общей эксергии продуктов ТЭЦ

Общую эксергию продуктов ТЭЦ E , МВт·ч, вычисляют по формуле

$$E = E_N + E_{\Pi} + E_T.$$

Значения эксергий различных продуктов ТЭЦ E_N , E_{Π} , E_T , МВт·ч, определяют выражения:

- эксергия электроэнергии

$$E_N = N;$$

- эксергия промышленного пара

$$E_{\Pi} = Q_{\Pi} \cdot \left(1 - \frac{T_{env}}{T_{\Pi}}\right);$$

- эксергия тепла

$$E_T = Q_T \cdot \left(1 - \frac{T_{env}}{T_T}\right).$$

Здесь T_{env} , К, – температура окружающей среды; T_{Π} , T_T , К, – средние температуры тепловых потоков промышленного пара Q_{Π} и пара низкого давления, требуемого на нагрев сетевой воды Q_T .

Величину T_{Π} вычисляют по формуле

$$T_{\Pi} = \frac{H_{\Pi}^c - H_{\Pi}}{S_{\Pi}^c - S_{\Pi}},$$

где H_{Π} , S_{Π} – энтальпия (кДж/кг) и энтропия (кДж/кг·К) промышленного пара в коллекторе; H_{Π}^c , S_{Π}^c – энтальпия и энтропия конденсата промышленного пара.

Значение T_T определяет аналогичное выражение

$$T_T = \frac{H_T^c - H_T}{S_T^c - S_T},$$

где H_T , S_T – энтальпия и энтропия пара низкого давления, расходуемого для нагрева сетевой воды Q_T ; H_T^c , S_T^c – энтальпия и энтропия конденсата пара низкого давления.

2) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива на выработку электроэнергии определяет зависимость

$$B_N = \frac{E_N}{E} \cdot B.$$

Расходы условного топлива на выработку промышленного пара и тепла равны соответственно

$$B_{\Pi} = \frac{E_{\Pi}}{E} \cdot B,$$

$$B_T = \frac{E_T}{E} \cdot B.$$

3) Расчет удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.2.3 Метод пропорционального распределения от компании ОРГРЭС

Метод был утвержден в качестве официального метода при составлении отчетности по экономичности работы оборудования ТЭЦ в период с 1996 по 2013 год [4, 14].

Метод расчета требует ряд дополнительных исходных данных:

- общий расход пара высокого давления;
- энтальпии различных видов пара;
- энтальпия основного конденсата;
- коэффициент учета регенеративного подогрева питательной воды k .

Рассматриваемый метод решения задачи состоит из четырех шагов.

1) Определение коэффициентов ценности паров

Коэффициент ценности промышленного пара определяет выражение

$$\gamma_{\Pi} = \frac{H_{\Pi} - H_0^c}{H_0 - H_0^c} \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{H_0 - H_{\Pi}}{H_0 - H_0^c} \right) \right), \quad (6)$$

где H_0 и H_0^c – энтальпия пара высокого давления и его конденсата, кДж/кг. Значение коэффициента k является справочным и зависит от типа оборудования ТЭЦ [14].

Аналогичным образом определяют коэффициент ценности пара низкого давления

$$\gamma_T = \frac{H_T - H_0^c}{H_0 - H_0^c} \cdot \left(1 + k \cdot \left(\frac{H_0 - H_T}{H_0 - H_0^c} \right) \right). \quad (7)$$

2) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии

Расход условного топлива на выработку электроэнергии N вычисляют по формуле

$$B_N = B \cdot \gamma_{dN}, \quad (8)$$

где γ_{dN} – коэффициент расхода топлива на выработку электроэнергии. Коэффициент получают на основании зависимости

$$\gamma_{dN} = \frac{Q_N + \Delta Q_N}{Q_N + \Delta Q_N + Q_{\Pi} + Q_T}.$$

Здесь Q_N – расход пара на выработку электроэнергии, рассчитанный по «физическому» методу (5); ΔQ_N – дополнительный расход пара на выработку электроэнергии, МВт·ч, равный

$$\Delta Q_N = Q_{\Pi} \cdot (1 - \gamma_{\Pi}) + Q_T \cdot (1 - \gamma_T).$$

Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии b_N вычисляют на основании зависимости (1).

3) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск промышленного пара

Удельный расход условного топлива на выработку промышленного пара определяет выражение

$$b_{\Pi}^{\text{выр}} = b_{\Pi\text{T}} - \Delta b_{\Pi},$$

где $b_{\Pi\text{T}}$ — общий удельный расход условного топлива на выработку промышленного пара и тепла, т.у.т./МВт·ч; Δb_{Π} — снижение удельного расхода условного топлива на выработку промышленного пара, т.у.т./МВт·ч.

Общий удельный расход условного топлива на выработку промышленного пара и тепла вычисляют следующим образом:

$$b_{\Pi\text{T}} = \frac{B_{\Pi\text{T}}}{Q_{\Pi} + Q_{\text{T}}}.$$

Здесь $B_{\Pi\text{T}}$ — общий расход условного топлива на выработку промышленного пара и тепла, определяемый выражением

$$B_{\Pi\text{T}} = B - B_N. \quad (9)$$

Величину B_N вычисляют на предыдущем шаге (8).

Снижение удельного расхода условного топлива на выработку промышленного пара задает выражение

$$\Delta b_{\Pi} = \Delta b_{\Pi\text{T}} \cdot \frac{(1 - \gamma_{\Pi})}{(1 - \gamma_{\Pi\text{T}})}.$$

Здесь $\Delta b_{\Pi\text{T}}$ — общее снижение удельного расхода условного топлива на выработку промышленного пара и тепла, т.у.т./МВт·ч; $\gamma_{\Pi\text{T}}$ — среднее значение коэффициента ценности промышленного пара и пара низкого давления. Значение $\Delta b_{\Pi\text{T}}$ вычисляют по формуле

$$\Delta b_{\Pi\text{T}} = b_{\Pi\text{T}} \cdot \left(\frac{Q_N + \Delta Q_N + Q_{\text{T}} + Q_{\Pi}}{Q_N + Q_{\text{T}} + Q_{\Pi}} - 1 \right). \quad (10)$$

Величину $\gamma_{\Pi\text{T}}$ определяет выражение

$$\gamma_{\Pi\text{T}} = \frac{Q_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi} + Q_{\text{T}} \cdot \gamma_{\text{T}}}{Q_{\Pi} + Q_{\text{T}}}. \quad (11)$$

Удельный расход условного топлива на отпуск промышленного пара вычисляют следующим образом:

$$b_{\Pi} = b_{\Pi}^{\text{выр}} \cdot \frac{Q_{\Pi}}{Q_{\Pi} - Q_{\Pi}^{\text{CH}}}.$$

4) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск тепла

Удельный расход условного топлива на выработку тепла задает выражение

$$b_{\text{T}}^{\text{выр}} = b_{\Pi\text{T}} - \Delta b_{\text{T}}.$$

Здесь Δb_{T} — снижение удельного расхода условного топлива на выработку тепла, т.у.т./МВт·ч, равное

$$\Delta b_{\text{T}} = \Delta b_{\Pi\text{T}} \cdot \frac{(1 - \gamma_{\text{T}})}{(1 - \gamma_{\Pi\text{T}})}.$$

Величины $\Delta b_{\text{ПТ}}$, $\gamma_{\text{ПТ}}$ вычисляют по формулам (10), (11) соответственно.

Удельный расход условного топлива на отпуск тепла равен

$$b_{\text{T}} = b_{\text{T}}^{\text{выр}} \cdot \frac{Q_{\text{T}}}{Q_{\text{T}} - Q_{\text{T}}^{\text{сн}}}.$$

2.2.4 Метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию

Метод основан на учете недовыработки электроэнергии в результате отвода пара части высокого давления на производство промышленного пара и тепла [4]. Метод применяется в странах с развитыми рынками электроэнергии и называется *work method* [2] (п. 2.3.2).

Метод требует исходных данных по дополнительным режимам работы ТЭЦ, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Данные дополнительных режимов работы ТЭЦ

Исходный режим	Режим №1	Режим №2	Режим №3
Q_0	$Q_0^1 = Q_0$	$Q_0^2 = Q_0$	$Q_0^3 = Q_0$
$Q_{\text{П}}$	$Q_{\text{П}}^1 = 0$	$Q_{\text{П}}^2 = Q_{\text{П}}$	$Q_{\text{П}}^3 = 0$
Q_{T}	$Q_{\text{T}}^1 = Q_{\text{T}}$	$Q_{\text{T}}^2 = 0$	$Q_{\text{T}}^3 = 0$
N	N^1	N^2	N^3

Выработку электроэнергии N^1 , N^2 , N^3 определяют на основании *нормативно-технической документации по топливоиспользованию* [15] для указанных в таблице значений расхода пара высокого давления, промышленного пара и выработки тепла.

Рассматриваемый метод решения задачи состоит из трех шагов.

1) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии

Расход условного топлива, отнесенный на выработку электроэнергии, определяет выражение

$$B_N = B \cdot \frac{N}{N^3}.$$

Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии вычисляют на основании зависимости (1).

2) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск промышленного пара

Величина расхода условного топлива на выработку промышленного пара равна

$$B_{\text{П}} = \frac{B_{\text{ПТ}}}{1 + \frac{1}{\gamma_{\text{ПТ}}}}.$$

В данном методе коэффициент $\gamma_{\text{ПТ}}$ определяет соотношение расходов условного топлива на выработку промышленного пара и тепла. Значение этого коэффициента задает выражение

$$\gamma_{\text{ПТ}} = \frac{N^3 - N^1}{N^3 - N^2}.$$

Значение $B_{\text{ПТ}}$ вычисляют по формуле (9), удельный расход условного топлива на отпуск промышленного пара – по формуле (2).

3) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск тепла

Расход условного топлива на выработку тепла равен

$$B_{\text{Т}} = \frac{B_{\text{П}}}{\gamma_{\text{ПТ}}}.$$

Значение $\gamma_{\text{ПТ}}$ рассчитано на предыдущем шаге.

Удельный расход условного топлива на отпуск тепла вычисляют по формуле (3).

2.2.5 Метод, учитывающий тепловую ценность пара

Метод основан на учете энергетического качества различных видов паров при помощи коэффициентов ценности паров, рассчитанных по методу пропорционального распределения от компании ОРГРЭС (п. 2.2.3).

Дополнительными исходными данными являются:

- общий расход пара высокого давления;
- энтальпии различных видов пара;
- энтальпия основного конденсата;
- коэффициент учета регенеративного подогрева питательной воды k .

Метод расчета состоит из четырех шагов.

1) Вычисление коэффициентов ценности паров

Коэффициенты ценности паров $\gamma_{\text{П}}$, $\gamma_{\text{Т}}$ вычисляют на основании формул (6), (7) соответственно.

2) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии

Расход условного топлива, отнесенный на выработку электроэнергии, определяет выражение

$$B_{\text{Н}} = B \cdot \gamma_{\text{БН}}, \quad (12)$$

где $\gamma_{\text{БН}}$ – коэффициент расхода топлива на выработку электроэнергии, вычисляемый следующим образом:

$$\gamma_{\text{БН}} = \frac{Q_0 - (Q_{\text{П}} \cdot \gamma_{\text{П}} + Q_{\text{Т}} \cdot \gamma_{\text{Т}})}{Q_0}.$$

Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии вычисляют на основании зависимости (1).

3) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск промышленного пара

Аналогично (12), расход условного топлива на выработку промышленного пара задает формула

$$B_{\text{П}} = B \cdot \gamma_{\text{БП}},$$

где $\gamma_{B\Pi}$ – коэффициент расхода топлива на выработку промышленного пара, равный

$$\gamma_{B\Pi} = \frac{Q_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi}}{(Q_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi} + Q_{T} \cdot \gamma_{T})}.$$

Удельный расход условного топлива на отпуск промышленного пара вычисляют по формуле (2).

4) Расчет удельного расхода условного топлива на отпуск тепла

Расход условного топлива на выработку тепла определяет выражение

$$B_T = B \cdot \gamma_{B_T},$$

где γ_{B_T} – коэффициент расхода топлива на выработку тепла, его значение рассчитывают по формуле

$$\gamma_{B_T} = \frac{Q_T \cdot \gamma_T}{(Q_{\Pi} \cdot \gamma_{\Pi} + Q_T \cdot \gamma_T)}.$$

Удельный расход условного топлива на отпуск тепла вычисляют по формуле (3).

2.3 Методы решения задачи в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла

В странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла, главным образом, решают задачи разнесения затрат на топливо (cost allocation) и расчета себестоимости производства единицы продукции ТЭЦ (electricity cost, heat cost) [1, 2, 6]. Целью решения указанных задач является повышение конкурентоспособности ТЭЦ на рынках электроэнергии и тепла. Задача расчета себестоимости производства единицы продукции ТЭЦ является аналогом задачи расчета удельных расходов условного топлива.

В рамках настоящей работы западные методы решения задачи расчета себестоимости продуктов ТЭЦ были адаптированы для решения задачи расчета удельных расходов условного топлива, принятой в России (п. 1). При этом приняли следующие соглашения.

- Затраты на топливо и расход топлива связывает выражение

$$C_B = B \cdot Z_B,$$

где C_B – затраты на топливо, руб.; Z_B – цена условного топлива, руб./т.у.т.

- Себестоимость продуктов ТЭЦ и удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, промышленного пара и тепла связывают следующие формулы:

$$Z_N = b_N \cdot Z_B; \quad (13)$$

$$Z_{\Pi} = b_{\Pi} \cdot Z_B; \quad (14)$$

$$Z_T = b_T \cdot Z_B. \quad (15)$$

Здесь Z_N , Z_{Π} , Z_T – себестоимости отпуска продуктов ТЭЦ, руб./МВт·ч. Данные величины в России принято называть *топливными составляющими себестоимости* [5].

Поскольку учет затрат на отпуск промышленного пара в ряде работ не производится [2,6], рассматриваемые в этих работах методы были дополнены исходя из следующих соображений:

- альтернативой комбинированному производству промышленного пара является выработка пара редукционной охлаждающей установкой;
- отпуск промышленного пара осуществляется по договорной цене, не подверженной рыночным рискам.

2.3.1 Эксергетический метод (exergy method)

Эксергетический метод, применяемый в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла, идентичен эксергетическому методу, применяемому в России (п. 2.2.2). Главным образом, метод используется для оценки технической эффективности работы ТЭЦ.

2.3.2 Рабочий метод (work method)

Рабочий метод идентичен методу, учитывающему недовыработанную электроэнергию, применяемому в России (п. 2.2.4). Главным образом, метод используется для оценки технической эффективности работы ТЭЦ.

2.3.3 Энергетический метод (energy method)

Решение задачи данным методом состоит из двух следующих шагов [2].

1) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива, отнесенный на выработку электроэнергии, рассчитывают по формуле

$$B_N = B \cdot \frac{N}{N + Q_{\Pi} + Q_T}.$$

Расходы условного топлива на выработку промышленного пара и тепла задают выражения

$$B_{\Pi} = B \cdot \frac{Q_{\Pi}}{N + Q_{\Pi} + Q_T},$$

$$B_T = B \cdot \frac{Q_T}{N + Q_{\Pi} + Q_T}.$$

2) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.3.4 Метод альтернативного производства тепла (method of alternative way of heat supply)

В рамках метода предполагают, что альтернативой комбинированной выработке тепла является выработка тепла Q_T водогрейным котлом и промышленного пара Q_{Π} – редукционной охлаждающей установкой [1, 2].

Дополнительными исходными данными являются:

- КПД водогрейного котла;
- КПД парового котла;

- КПД редукционной охлаждающей установки, который условно принимают равным 100%.

Решение задачи данным методом состоит из двух шагов.

1) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива, отнесенный на альтернативную выработку тепла, задает выражение

$$B_T = B_T^a = \frac{Q_T}{\eta_{BK}} \cdot \gamma_{TUT}, \quad (16)$$

где γ_{TUT} – коэффициент, равный 0,123 т.у.т./МВт·ч.

Расход условного топлива на выработку промышленного пара вычисляют аналогичным образом:

$$B_{\Pi} = B_{\Pi}^a = \frac{Q_{\Pi}}{\eta_{PK}} \cdot \gamma_{TUT}. \quad (17)$$

Здесь η_{BK} – КПД водогрейного котла, η_{PK} – КПД парового котла.

Отметим, что КПД водогрейного котла является переменной величиной и может принимать значения в диапазоне от 92% до 112%, что позволяет гибко перераспределять расход топлива между теплом и электроэнергией в зависимости от рыночных ожиданий. Рекомендации по установке данного значения приведены в работе [2].

Расход условного топлива на выработку электроэнергии рассчитывают по формуле

$$B_N = B - (B_{\Pi} + B_T).$$

2) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.3.5 Метод альтернативного производства электроэнергии (method of alternative way of electricity supply)

В основе этого метода лежит предположение, что альтернативой комбинированной выработке электроэнергии служит *конденсационная выработка* [1, 2].

Дополнительным исходным значением является расход пара высокого давления Q_0^c на конденсационную выработку электроэнергии N . Величину Q_0^c определяют на основании нормативно-технической документации по топливоиспользованию [15].

Решение задачи данным методом состоит из двух шагов.

1) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива, отнесенный на выработку электроэнергии, определяет выражение

$$B_N = B_N^a = B \cdot \frac{Q_0^c}{Q_0}. \quad (18)$$

Расходы условного топлива на выработку промышленного пара и тепла равны соответственно

$$B_{\Pi} = (B - B_N) \cdot \frac{Q_{\Pi}}{Q_{\Pi} + Q_T},$$

$$B_T = (B - B_N) \cdot \frac{Q_T}{Q_{\Pi} + Q_T}.$$

2) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.3.6 Метод разнесения экономии (benefit distribution method)

Метод основан на разнесении расхода условного топлива пропорционально расходу при альтернативной выработке всех продуктов ТЭЦ. Рассматриваемый метод является комбинацией методов альтернативного производства тепла (п. 2.3.4) и альтернативного производства электроэнергии (п. 2.3.5) [2].

Дополнительными данными для метода являются:

- КПД водогрейного котла;
- КПД парового котла;
- КПД редуцирующей охлаждающей установки, который условно принимают равным 100%;
- расход пара высокого давления на конденсационную выработку электроэнергии.

Решение задачи данным методом состоит из двух шагов.

1) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива, отнесенный на альтернативную выработку электроэнергии, определяет выражение (18), расход условного топлива, отнесенный на альтернативную выработку промышленного пара, – зависимость (17), расход условного топлива, отнесенный на альтернативную выработку тепла, – формула (16).

Отметим, что в данном методе используют номинальное значение КПД водогрейного котла в отличие от метода альтернативного производства тепла, в котором эта величина является переменной [2, 6].

Общий расход на альтернативное производство трех продуктов имеет вид

$$B^a = B_N^a + B_{\Pi}^a + B_T^a.$$

Расход условного топлива на электроэнергию при комбинированном производстве определяет выражение

$$B_N = B \cdot \frac{B_N^a}{B^a}.$$

Расходы условного топлива на промышленный пар и тепло при комбинированном производстве вычисляют аналогично:

$$B_{\Pi} = B \cdot \frac{B_{\Pi}^a}{B^a},$$

$$B_T = B \cdot \frac{B_T^a}{B^a}.$$

2) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляют по формулам (1) – (3).

2.3.7 Метод разнесения экономии и риска (benefit and risk sharing method)

Метод позволяет учитывать риск изменения рыночной цены на электроэнергию [2]. Дополнительной в этом случае является величина ожидаемого рыночного изменения цены на электроэнергию $r \in [-1; 1]$, отражающая тенденции на рынке. Величина r принимает положительное значение при ожидании роста цен на электроэнергию и отрицательное – при ожидании падения этих цен.

Поскольку в настоящей работе речь идет о задаче расчета удельных расходов условного топлива, величину r учитываем в изменении удельных расходов. Напомним, что связь удельных расходов условного топлива и себестоимости продуктов ТЭЦ задают выражения (13) – (15).

Решение задачи данным методом состоит из двух шагов.

1) Расчет удельного расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расчет осуществляют по методу альтернативного производства тепла (п 2.3.4).

2) Изменение удельных расходов условного топлива электроэнергии и тепла

Для одновременного повышения конкурентоспособности на рынках электроэнергии и тепла осуществляют перераспределение расхода условного топлива между двумя этими рыночными продуктами. Основным продуктом является электроэнергия, поскольку ее рыночные цены наиболее волатильны (изменчивы). Значение r применяют для переоценки величины удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии следующим образом:

$$b_N^M = b_N \cdot (1 + r).$$

Для соблюдения топливного баланса (4) производят корректировку удельного расхода условного топлива на тепла

$$b_T^M = \frac{(B - B_{\Pi}) - b_N^M \cdot (N - N^{\text{CH}})}{Q_T - Q_T^{\text{CH}}}.$$

Таким образом, при повышении удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии снижают удельный расход условного топлива на отпуск тепла и наоборот. Величины b_N^M и b_T^M являются основой для формирования заявок на рынки (*market*), значение b_{Π} не изменяется.

3. Метод расчета удельных расходов топлива, основанный на применении линеаризованной расходной характеристики паровой турбины

3.1 Линеаризованная расходная характеристика паровой турбины

Линеаризованная расходная характеристика паровой турбины имеет вид [16]

$$Q_0^g = \alpha_N^g \cdot N^g + \alpha_{\Pi}^g \cdot Q_{\Pi}^g + \alpha_T^g \cdot Q_T^g + \alpha_0^g + \varepsilon^g, \quad (19)$$

где $g \in [1: G]$ – номер паровой турбины; α_i^g – постоянные коэффициенты уравнения расходной характеристики; ε^g – ошибка линеаризации. Алгоритм определения коэффициентов α_i^g предложен в работе [16]. Средняя ошибка линеаризации различных типов паровых турбины составляет 0,6%. Подробный анализ ошибки линеаризации представлен в статье [16].

Общий расход пара высокого давления турбиной g разделим на три составляющие следующим образом:

$$Q_0^g = Q_0^g(N) + Q_0^g(Q_{\Pi}) + Q_0^g(Q_T). \quad (20)$$

Здесь $Q_0^g(N)$, $Q_0^g(Q_{\Pi})$, $Q_0^g(Q_T)$ – расходы пара высокого давления на выработку электроэнергии, промышленного пара, тепла соответственно, МВт·ч.

Определим расход пара высокого давления на выработку турбиной электроэнергии на основании расходной характеристики (19):

$$Q_0^g(N) = \alpha_N^g \cdot N^g + \alpha_0^g.$$

Величину α_0^g называют *условный расход на холостой ход* и относят на выработку электроэнергии [17].

Расходы пара высокого давления на выработку турбиной промышленного пара и тепла зададим выражениями

$$Q_0^g(Q_{\Pi}^g) = \alpha_{\Pi}^g \cdot Q_{\Pi}^g,$$

$$Q_0^g(Q_T^g) = \alpha_T^g \cdot Q_T^g.$$

3.2 Описание метода

Метод относится к термодинамическим методам расчета удельных расходов условного топлива. Метод основан на уравнении пара высокого давления (20).

Дополнительными исходными данными являются коэффициенты линеаризованных расходных характеристик паровых турбин ТЭЦ [16].

Решение задачи данным методом состоит из трех шагов.

1) Определение расходов пара высокого давления на выработку продуктов ТЭЦ

Для совокупности паровых турбин ТЭЦ расход пара высокого давления на выработку электроэнергии равен

$$Q_0(N) = \sum_{g=1}^G Q_0^g(N^g) = \sum_{g=1}^G (\alpha_N^g \cdot N^g + \alpha_0^g),$$

где $Q_0(N)$ – суммарный расход пара высокого давления на выработку электроэнергии N .

Аналогично определим расходы пара высокого давления на выработку промышленного пара и тепла ТЭЦ:

$$Q_0(Q_{\Pi}) = \sum_{g=1}^G Q_0^g(Q_{\Pi}^g) = \sum_{g=1}^G \alpha_{\Pi}^g \cdot Q_{\Pi}^g;$$

$$Q_0(Q_T) = \sum_{g=1}^G Q_0^g(Q_T^g) = \sum_{g=1}^G \alpha_T^g \cdot Q_T^g.$$

2) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива на выработку электроэнергии имеет вид

$$B_N = B \cdot \frac{Q_0(N)}{Q_0}.$$

Аналогично, расходы условного топлива на выработку промышленного пара и тепла определяют выражения

$$B_{\Pi} = B \cdot \frac{Q_0(Q_{\Pi})}{Q_0},$$

$$B_T = B \cdot \frac{Q_0(Q_T)}{Q_0}.$$

3) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива вычисляем по формулам (1) – (3).

3.3 Пример расчета

В рассматриваемой ТЭЦ комбинированное производство осуществляется турбиной ПТ-135. Принципиальная схема ТЭЦ приведена в [4], а также в приложении к настоящей статье <http://mbureau.ru/sites/default/files/Chuchueva-Fuel-Rate.xlsx>.

Исходные данные:

- выработка электроэнергии $N = 80 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, собственные нужды по электроэнергии $N^{\text{CH}} = 3 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$;
- выработка промышленного пара $Q_{\Pi} = 144,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, собственные нужды по промышленному пару $Q_{\Pi}^{\text{CH}} = 0 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$;
- выработка тепла $Q_T = 93 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$, собственные нужды по теплу $Q_T^{\text{CH}} = 0 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$;
- общий расход условного топлива $B = 48,4 \text{ т.т.}$;
- коэффициенты линеаризации паровой турбины ПТ-135 $\alpha_N = 1,8492$, $\alpha_{\Pi} = 0,7146$, $\alpha_T = 0,2820$, $\alpha_0 = 95,6873$.

1) Определение расходов пара высокого давления на выработку продуктов ТЭЦ

Расход пара высокого давления на выработку электроэнергии равен

$$Q_0(N) = \alpha_N \cdot N + \alpha_0 = 1,8492 \cdot 80 + 95,6873 = 243,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Расходы пара высокого давления на выработку промышленного пара и тепла равны соответственно

$$Q_0(Q_{\Pi}) = \alpha_{\Pi} \cdot Q_{\Pi} = 0,7146 \cdot 144,2 = 103,1 \text{ МВт} \cdot \text{ч},$$

$$Q_0(Q_T) = \alpha_T \cdot Q_T = 0,2820 \cdot 93 = 26,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда общий расход пара высокого давления определяет выражение

$$Q_0 = Q_0(N) + Q_0(Q_{\Pi}) + Q_0(Q_T) = 243,6 + 103,1 + 26,2 = 372,9 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

2) Разнесение общего расхода условного топлива на продукты ТЭЦ

Расход условного топлива на выработку электроэнергии имеет вид

$$B_N = B \cdot \frac{Q_0(N)}{Q_0} = 48,4 \cdot \frac{243,6}{372,9} = 31,6 \text{ т.у.т.}$$

Расходы условного топлива на выработку промышленного пара и тепла равны

$$B_{\Pi} = B \cdot \frac{Q_0(Q_{\Pi})}{Q_0} = 48,4 \cdot \frac{103,1}{372,9} = 13,4 \text{ т.у.т.},$$

$$B_T = B \cdot \frac{Q_0(Q_T)}{Q_0} = 48,4 \cdot \frac{26,2}{372,9} = 3,4 \text{ т.у.т.}$$

3) Вычисление удельных расходов условного топлива

Удельные расходы условного топлива на отпуск электроэнергии, промышленного пара и тепла ТЭЦ равны соответственно

$$b_N = \frac{B_N}{N - N^{\text{CH}}} = \frac{31,6}{80 - 3} = 0,411 \frac{\text{т.у.т.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}},$$

$$b_{\Pi} = \frac{B_{\Pi}}{Q_{\Pi} - Q_{\Pi}^{\text{CH}}} = \frac{13,4}{144,2 - 0} = 0,093 \frac{\text{т.у.т.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}},$$

$$b_T = \frac{B_T}{Q_T - Q_T^{\text{CH}}} = \frac{3,4}{93 - 0} = 0,037 \frac{\text{т.у.т.}}{\text{МВт} \cdot \text{ч}}.$$

Дополнительные расчеты приведены в приложении

<http://mbureau.ru/sites/default/files/Chuchueva-Fuel-Rate.xlsx>.

4. Сравнение методов

Поскольку термодинамические и экономические методы расчета удельных расходов условного топлива разработаны для достижения различных целей, отдельно проводим сравнение методов указанных групп.

4.1 Сравнение термодинамических методов

4.1.1 Принцип сравнения методов

Наиболее важной особенностью термодинамических методов является возможность учета а) неэквивалентности тепловой и электрической энергий, б) неэквивалентности различных видов тепловой энергии. Сравнение термодинамических методов производим в два этапа.

На первом этапе для каждого метода устанавливаем, позволяет ли он учесть указанные неэквивалентности. Если метод позволяет учесть обе неэквивалентности, то считаем его эффективным; если позволяет учет только одного вида неэквивалентности – менее

эффективным; методы, которые не позволяют учесть обе неэквивалентности, считаем неэффективными.

На втором этапе упорядочиваем методы внутри соответствующей подгруппы (эффективные, менее эффективные, неэффективные) по мере сокращения их применимости.

4.1.2 Эффективность, достоинства и недостатки методов

Результаты сравнения термодинамических методов расчета удельных расходов условного топлива на основании изложенного принципа представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнения термодинамических методов

№	Метод	Учет неэквивалентности электроэнергии и тепловой энергии	Учет неэквивалентности различных видов тепловой энергии	Механизм учета неэквивалентности	Эффективность
1)	Эксергетический метод (п. 2.2.2)	Позволяет	Позволяет	Эксергия	Эффективные методы
2)	Метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию (п. 2.2.4)	Позволяет	Позволяет	Технические характеристики оборудования ТЭЦ	
3)	Метод, основанный на линеаризованной расходной характеристике паровой турбины (п. 3)	Позволяет	Позволяет	Коэффициенты линеаризованной расходной характеристики	
4)	Метод пропорционального распределения от компании ОРГРЭС (п. 2.2.3)	Не позволяет	Позволяет	Коэффициенты ценности различных видов пара	Менее эффективные методы
5)	Метод, учитывающий тепловую ценность пара (п. 2.2.5)	Не позволяет	Позволяет		
6)	«Физический» метод (п. 2.2.1)	Не позволяет	Не позволяет	—	Неэффективный метод

- 1) Эксергетический метод (п. 2.2.2, 2.3.1) считают наиболее широко применимым, «справедливым» (“fair”) и точным термодинамическим методом [2, 4], поскольку он позволяет учесть неэквивалентности различных видов энергий при помощи эксергии. Его главным недостатком является сложность вычислений и большое число дополнительных исходных данных [2, 4].
- 2) Метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию (п. 2.2.4), является одним из наиболее широко применяемых термодинамических методов, поскольку по-

зволяет учитывать неэквивалентность различных видов энергий при помощи расходных характеристик оборудования ТЭЦ [2, 4]. Главными недостатками данного метода являются сложность вычислений и большое число дополнительных исходных данных [2, 4].

- 3) Метод, предложенный в настоящей работе, позволяет учесть неэквивалентности различных видов энергий при помощи коэффициентов линеаризованной расходной характеристики турбина. К достоинствам данного метода также стоит отнести простоту вычислений. Недостатком метода является необходимость решения задачи определения указанных коэффициентов (п. 3.2).
- 4) Достоинством метода пропорционального распределения от компании ОРГРЭС (п. 2.2.3) является учет энергетического качества различных видов тепла при помощи специальных коэффициентов. Его недостатком считают отсутствие сопоставления электрической энергии и тепла. Другие недостатки данного метода заключаются в сложности вычислений и большом числе дополнительных исходных данных [4].
- 5) Метод, учитывающий тепловую ценность пара (п. 2.2.5), аналогичен методу пропорционального распределения от компании ОРГРЭС и обладает схожими достоинствами и недостатками [4].
- 6) «Физический» метод (п. 2.2.1) является наиболее критикуемым в литературе методом расчета [3, 4, 8]. Метод не позволяет учитывать неэквивалентность различных видов энергий и не соответствует Второму закону термодинамики [4, 8]. Согласно автору [4]: *«Использование этого метода позволило искусственно уменьшить удельные расходы топлива на производство электроэнергии ТЭЦ и без каких-либо технических преобразований добиться передовых позиций в мировой энергетике»*. Применение данного метода в качестве официального приводит к искусственному завышению тарифов на тепло [3]. Единственным достоинством данного метода является его простота [4].

4.1.3 Сравнение численных результатов

В настоящей работе были реализованы все рассмотренные выше термодинамические методы расчета удельных расходов условного топлива. Исходные данные для расчета взяты из методических указаний [4]. Результаты представлены в файле <http://mbureau.ru/sites/default/files/Chuchueva-Fuel-Rate.xlsx>.

Полученные значения удельных расходов условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ при комбинированном производстве представлены в табл. 3 и иллюстрирующем ее рис. 1.

Таблица 3. Результаты расчетов удельных расходов условного топлива при комбинированной выработке продуктов ТЭЦ

№	Метод	Удельный расход условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ, т.у.т./МВт·ч		
		Электроэнергия	Промышленный пар	Тепло
1)	Эксергетический метод (п. 2.2.2)	0,331	0,117	0,065
2)	Метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию (п. 2.2.4)	0,362	0,110	0,050
3)	Метод, основанный на линеаризованной расходной характеристике паровой турбины (п. 3)	0,411	0,093	0,037
4)	Метод пропорционального распределения от компании ОРГРЭС (п. 2.2.3)	0,320	0,112	0,083
5)	Метод, учитывающий тепловую ценность пара (п. 2.2.5)	0,425	0,090	0,030
6)	«Физический» метод (п. 2.2.1)	0,218	0,134	0,133

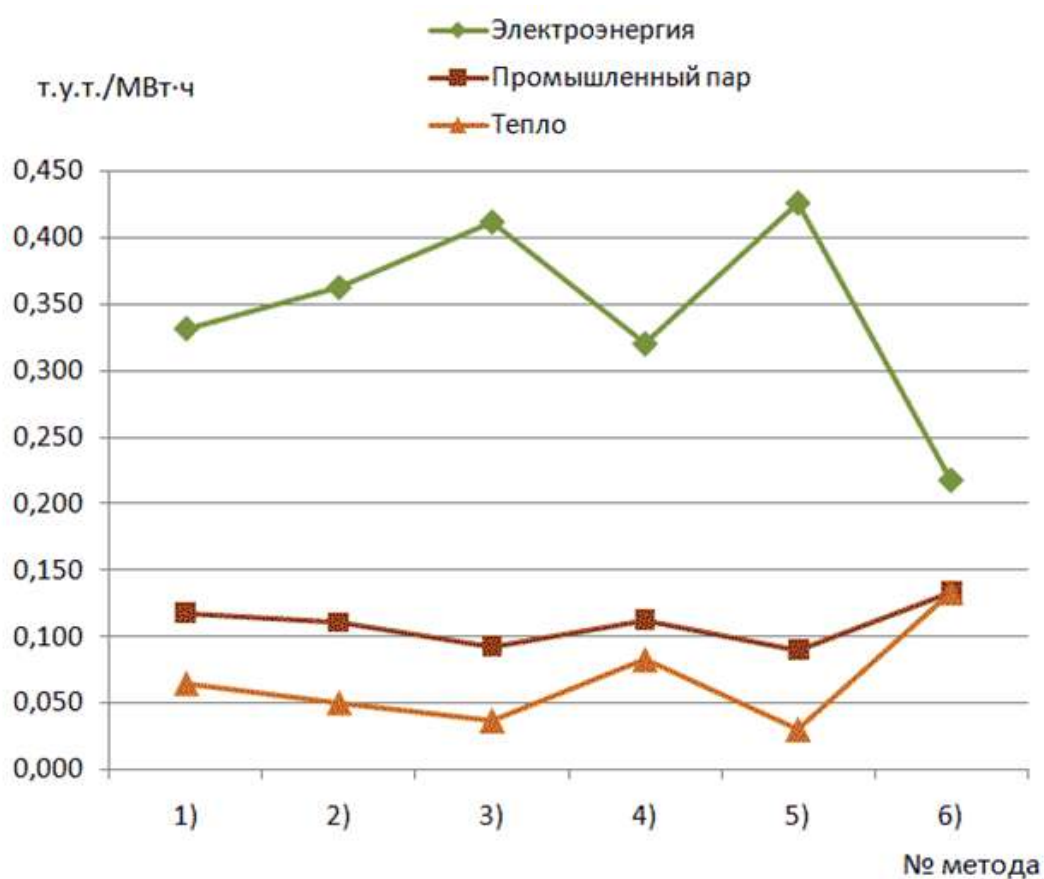


Рис. 1. Удельные расходы условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ, полученные термодинамическими методами расчета

Для рассмотренных методов величина b_N лежит в диапазоне от 0,218 до 0,425 т.у.т./МВт·ч; величина $b_{П-}$ в диапазоне от 0,090 до 0,134 т.у.т./МВт·ч; величина $b_{Т-}$ в диапазоне от 0,030 до 0,133 т.у.т./МВт·ч. Таким образом, в зависимости от применяемого метода значения удельных расходов условного топлива на отпуск продуктов различаются, практически, в два раза.

Отметим, что минимальное значение удельного расхода условного топлива на электроэнергию получено при расчете «физическим» методом (№6), а максимальное – при расчете методом, учитывающим тепловую ценность пара (№5). Оба этих метода являются наименее эффективными термодинамическими методами (табл. 2). Кроме того, из рис. 1 следует, что «физический» метод является единственным термодинамическим методом, не позволяющим учитывать неэквивалентность энергий промышленного пара и тепла.

Укажем экономические последствия применения «физического» метода для формирования тарифов на тепло и цен на электроэнергию. Во-первых, повышенный тариф на тепло позволяет ТЭЦ неэффективно работать на ОРЭМ, перекладывая часть расхода топлива и, как следствие, часть затрат с электрической энергии на тепловую. Во-вторых, повышенный тариф на тепло снижает конкурентоспособность тепловой энергии ТЭЦ по сравнению с котельными [3]. Таким образом, применение «физического» метода для решения экономических задач установки тарифов на тепло и формирования заявок на ОРЭМ приводит к торможению развития рыночных отношений в сфере электро- и теплоэнергетики.

4.2 Сравнение экономических методов

4.2.1 Принцип сравнения методов

Наиболее важной особенностью экономических методов расчета удельных расходов условного топлива является возможность перераспределения экономии между продуктами ТЭЦ. Сравнение экономических методов производим в два этапа.

На первом этапе устанавливаем, позволяет ли метод перераспределять экономию топлива между продуктами ТЭЦ. Если метод позволяет гибко перераспределять экономию в зависимости от рыночных ожиданий, то считаем его эффективным; если метод не обеспечивает указанную возможность, но разносит экономию между разными продуктами в заданной пропорции, то считаем метод менее эффективным; методы, относящие экономию лишь на один продукт ТЭЦ, считаем неэффективными.

На втором этапе упорядочиваем методы внутри подгруппы эффективных методов по мере уменьшения числа переменных, позволяющих перераспределять экономию; для подгруппы неэффективных – по мере сокращения их применимости.

4.2.2 Эффективность, достоинства и недостатки методов

Результаты сравнения экономических методов расчета удельных расходов условного топлива представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты сравнения экономических методов

№	Метод	Перераспределение экономии между продуктами ТЭЦ	Механизм перераспределения	Эффектив-ность
1)	Метод разнесения экономии и риска (п. 2.3.7)	Позволяет гибкое перераспределение в зависимости от рыночных ожиданий	Переменное значение КПД водогрейного котла, величина ожидаемого рыночного изменения цены на электроэнергию	Эффективные методы
2)	Метод альтернативного производства тепла (п. 2.3.4)	Позволяет гибкое перераспределение в зависимости от рыночных ожиданий	Переменное значение КПД водогрейного котла	
3)	Метод разнесения экономии (п. 2.3.6)	Не позволяет перераспределение, разносит экономию топлива между продуктами в установленной пропорции	Учет альтернативного производства как тепла, так и электроэнергии	Менее эффектив-ный метод
4)	Метод альтернативного производства электроэнергии (п. 2.3.5)	Не позволяет перераспределение, относит всю экономию на тепло	—	Неэффектив-ные методы
5)	Энергетический метод (п. 2.3.3)	Не позволяет перераспределение, относит всю экономию на электроэнергию	—	

- 1) Метод разнесения экономии и риска (п. 2.3.7) является наиболее гибким, его достоинством является возможность учета риска изменения рыночной цены на электроэнергию [2]. Метод позволяет перераспределять экономию топлива между продуктами ТЭЦ в зависимости от рыночных ожиданий. Недостатком данного метода является существенное повышение *волатильности* (изменчивости) рыночных цен при его широком применении, что недопустимо в странах со слабо развитыми рынками электроэнергии и тепла [2].
- 2) Метод альтернативного производства тепла (п. 2.3.4) является одним из наиболее широко применяемых методов расчета. Изменение величины КПД водогрейного котла позволяет гибко перераспределять экономию топлива между теплом и электроэнергией в зависимости от рыночных ожиданий [2]. Эта гибкость является достоинством метода. Широкое применения данного метода приводит к повышению волатильности рыночных цен, что можно отнести к его недостаткам.
- 3) Метод разнесения экономии (п. 2.3.6) также широко применяется в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла. Недостатком метода является отсутствие гибкости перераспределения экономии топлива в зависимости от рыночных ожиданий, поскольку экономия разносится на электроэнергию и тепло в установ-

ленной пропорции. Разделение экономии между продуктами ТЭЦ считают достоинством данного метода [2].

- 4) Метод альтернативного производства электроэнергии (п. 2.3.5) менее широко применяется на практике. Его недостатком является полное отнесение экономии топлива на тепловую энергию, что снижает конкурентоспособность ТЭЦ на рынке электроэнергии. Достоинством данного метода является его простота [2].
- 5) Энергетический метод (п. 2.3.3) – наименее гибкий экономический метод. Его единственным достоинством считают простоту вычислений [2, 6].

4.2.3 Сравнение численных результатов

В работе были реализованы все рассмотренные выше экономические методы расчета удельных расходов условного топлива. Исходными для расчета были те же данные, что и для расчета термодинамическими методами (п. 4.1.3). Полученные значения представлены в табл. 5 и на рис. 2.

Таблица 5. Результаты расчетов удельных расходов условного топлива при комбинированной выработке продуктов ТЭЦ

№	Метод	Удельный расход условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ, т.у.т./МВт·ч		
		Электроэнергия	Промышленный пар	Тепло
1)	Метод разнесения экономии и риска (п. 2.3.7)	0,241	0,134	0,114
2)	Метод альтернативного производства тепла (п. 2.3.4)	0,219	0,134	0,132
3)	Метод разнесения экономии (п. 2.3.6)	0,293	0,109	0,108
4)	Метод альтернативного производства электроэнергии (п. 2.3.5)	0,422	0,067	0,067
5)	Энергетический метод (п. 2.3.3)	0,159	0,153	0,153

Напомним, что при расчете экономическими методами значения топливных составляющих себестоимости приведены к удельным расходам условного топлива при помощи зависимостей (13) – (15). В методе альтернативного производства тепла использован номинальный КПД водогрейного котла, равный 93% (п. 2.3.4). В методе разнесения экономии и риска принято значение ожидаемого рыночного изменения цены на электроэнергию $r = 0,1$ (п. 2.3.7).

Для экономических методов аналогичные диапазоны величин удельных расходов условного топлива имеют значения: b_N – от 0,159 до 0,422 т.у.т./МВт·ч; $b_{П}$ – от 0,067 до 0,153 т.у.т./МВт·ч; b_T – от 0,067 до 0,153 т.у.т./МВт·ч. Заметим, что экономические методы расчета не учитывают различное качество энергий промышленного пара и тепла – значения $b_{П}$ и b_T для большинства методов одинаковы.

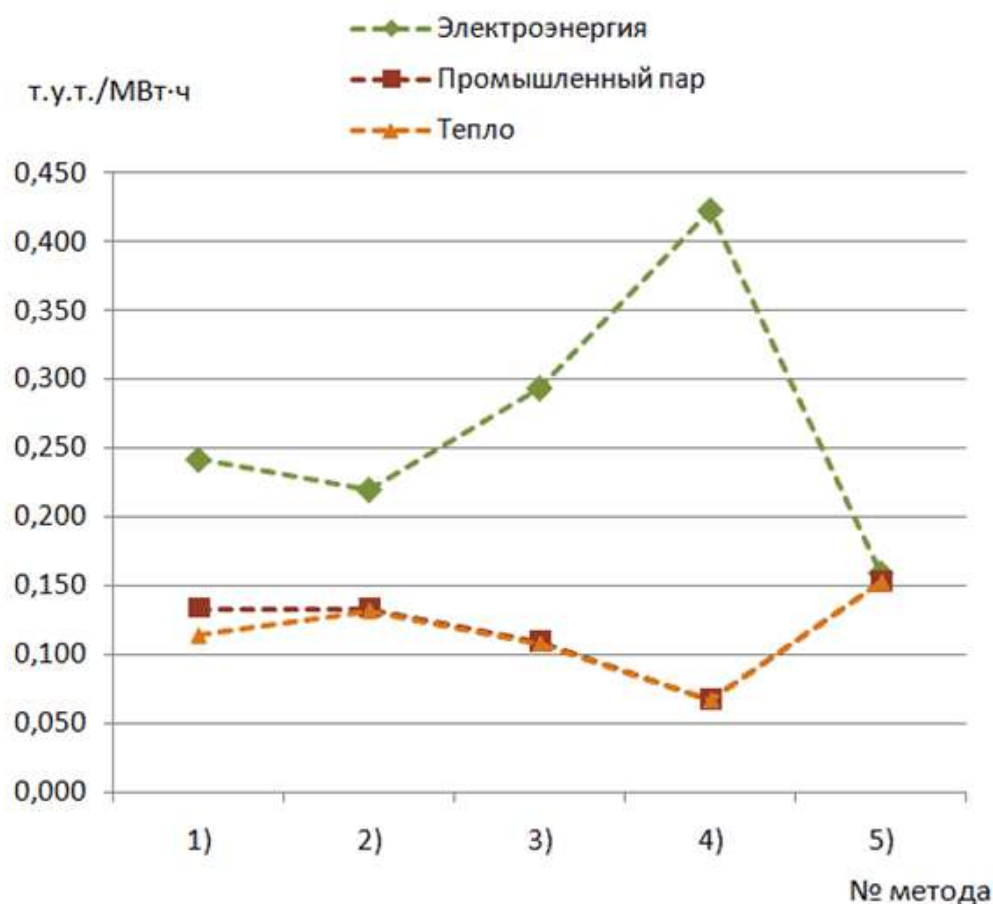


Рис. 2. Удельные расходы условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ, полученные экономическими методами расчета

Заключение

В работе получены следующие результаты.

- 1) Выполнен обзор наиболее часто применяемых в России, а также в странах с развитыми рынками электроэнергии и тепла методов расчета удельных расходов условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ при комбинированном производстве. Методы разделены на две группы: термодинамические и экономические.
- 2) Предложен новый термодинамический метод расчета удельных расходов условного топлива на отпуск продуктов ТЭЦ, основанный на использовании линеаризованной расходной характеристики паровой турбины. Метод позволяет учитывать неэквивалентность энергий всех продуктов ТЭЦ. Разработанный метод устраняет недостаток эффективных термодинамических методов – упрощает вычисления и уменьшает число исходных данных.
- 3) Выполнено сравнение термодинамических и экономических методов на основе сформулированных принципов и численных расчетов. Показано, что наиболее эффективными термодинамическими методами являются эксергетический метод и метод, учитывающий недовыработанную электроэнергию. Их главными недостатками являются большое число исходных данных и сложность вычислений. Наибо-

лее эффективными экономическими методами являются метод разнесения экономии и риска, а также метод альтернативного производства тепла. Основным недостатком этих методов считают повышение волатильности рыночных цен при широком применении данных методов.

- 4) Показано, что применение наименее эффективного термодинамического метода – «физического» метода – для оценки себестоимости продуктов тормозит развитие рыночных отношений в сфере электро- и теплоэнергетики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- проведен обзор российских методов расчета удельных расходов условного топлива, а также методов, применяемых в странах с развитыми рынками электроэнергетики и тепла;
- разработан новый термодинамический метод расчета удельных расходов условного топлива, основанный на использовании линеаризованной расходной характеристики паровой турбины;
- выполнено сравнение эффективности термодинамических и экономических методов на основе сформулированных принципов и результатов расчетов.

Перспективными направлениями развития работы являются.

- 1) Разработка формальных критериев эффективности для каждой группы методов, оценка существующих методов на основании этих критериев.
- 2) Пересмотр границ применимости методов. Для внутренней оценки качества режимов работы ТЭЦ целесообразно применять термодинамические методы расчета. Для формирования тарифов на тепловую энергию, а также заявок на ОРЭМ – экономические методы.

Список литературы

1. Nuorkivi A. Allocation of Fuel Energy and Emissions to Heat and Power in CHP // Energy-AN Consulting. September, 2010. P. 2-22.
2. Gochenour C., Silvennoinen A., Antila H., Pulkkinen R. Regulation of heat and electricity produced in combined heat-and-power plants. World Bank Technical Paper. October, 2003. 130 p.
3. Коростелева Т.С. Разработка процедур распределения затрат при формировании себестоимости энергии на ТЭЦ в рыночных условиях хозяйствования: автореф. дис. ... канд. экон. наук. Самара, 2005. 24 с.
4. Киселев Г.П. Варианты расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 32 с.
5. Регламенты Оптового рынка электроэнергии и мощности // Некоммерческое партнерство «Совет рынка»: сайт. Режим доступа: <http://www.npsr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm> (дата обращения 31.01.2016).

6. Siitonen S., Holmberg H. Estimating the value of energy saving in industry by different cost allocation methods // International Journal of Energy Research. 2012. Vol. 36, iss. 3. P. 324-334. DOI: [10.1002/er.1794](https://doi.org/10.1002/er.1794)
7. Deo-Jin Kim, Byung-Ryeal Choi. Cost Allocation of Electricity and Heat // Advances in Energy Research. 2011. Vol. 5. P. 271-309.
8. Хлебалин Ю.М. Теплофикация и второй закон термодинамики // Вестник СПбГУ. 2011. № 1 (54), вып. 3. С. 94-101.
9. Приказ Министерства энергетики РФ от 13 июня 2013 г. «Об утверждении методических указаний по расчету удельных расходов топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергию в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, применяемых в целях тарифного регулирования в сфере теплоснабжения».
10. Федеральный закон от 27.07.2010 г. N 190-ФЗ «О теплоснабжении».
11. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. N 323 «Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии».
12. Условное топливо // Wikipedia: The Free Encyclopedia: сайт. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Условное_топливо (дата обращения 31.01.2016).
13. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Melbourne: Krieger Publishing Company, 1995. 322 p.
14. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования / Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 1995.
15. РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций / Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 2000.
16. Чучуева И.А., Инкина Н.Е. Оптимизация работы ТЭЦ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности России // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 08. С. 195-238. DOI: [10.7463/0815.0792934](https://doi.org/10.7463/0815.0792934)
17. Синьков В.М. Оптимизация режимов энергетических систем. Киев: Вища школа, 1976. 307 с.

The Calculation Methods of the Specific Fuel Rate in Combined Heat and Electricity Production

I.A. Chuchueva^{1,*}

[*chuchueva@mbureau.ru](mailto:chuchueva@mbureau.ru)

¹Mathematical Bureau, Moscow, Russia

Keywords: combine production of heat and electricity, CHP, specific fuel rate, linear characteristic curves of steam turbine

The paper discusses a specific fuel rate in combined heat and electricity production using CHP technology. There are two objectives for calculation of specific fuel rate: a) CHP technical efficiency estimate, b) increasing CHP competitiveness at electricity and district heat markets. Currently, development of a number of thermo-dynamical methods of calculation solves the first problem while to solve the second one there is a number of developed economical methods of calculation. In Russia despite a decade of the wholesale electricity market progress the CHP market offers are still tightly connected with technical efficiency rate. To estimate the technical efficiency rate is widely used the least effective thermo-dynamical method – so called “physical” method”. The paper formulates a problem statement that is the specific fuel rate calculation and reviews the most widely applied methods. The review consists of two parts: in the first the Russian methods are discussed, and in the second one the methods widely used in the countries with highly developed electricity and district heat markets. A new thermo-dynamical method to calculate the specific fuel rate is introduced, which uses the linear characteristic curves of a steam turbine. The developed method allows us to take into consideration the energy inequality of the CHP products. Another advantages of this new method are calculation simplicity and small number of input data. To compare the effectiveness of different methods were introduced comparison rules and also calculations were performed. The comparison of thermo-dynamical methods shows that the most effective methods are an exergy method and also the method that takes into consideration the reduced generation of electricity (work method). Calculation complexity and large number of input data are main disadvantages of these methods. The comparison of economical methods shows that the most effective from stated point of view are a benefit and risk distribution method and a method of the alternative way of heat production. A drawback of these methods is that the volatility of market prices is raised with their wide application. The paper separately discusses results of calculations by “physical” method. It comes to conclusion that application of this the least effective thermo-dynamical method to calculate the cost of CHP products puts the brakes on the progress of market relations in electricity and district heat.

References

1. Nuorkivi A. Allocation of Fuel Energy and Emissions to Heat and Power in CHP. *Energy-AN Consulting*, September, 2010, pp. 2-22.
2. Gochenour C., Silvennoinen A., Antila H., Pulkkinen R. *Regulation of heat and electricity produced in combined heat-and-power plants. World Bank Technical Paper*. October, 2003. 130 p.
3. Korosteleva T.S. *Razrabotka protsedur raspredeleniya zatrat pri formirovaniy sebestoimosti energii na TETs v rynochnykh usloviyakh khozyaistvovaniya. Avtoreferat kand. diss.* [Development of procedures distribution costs during the formation of the cost of energy in CHP plants in market conditions. Abstract of cand. diss.]. Samara, 2005. 24 p. (in Russian).
4. Kiselev G.P. *Varianty rascheta udel'nykh pokazatelei effektivnosti raboty TETs* [Options for calculation of CHP plant specific performance indicators]. Moscow, MEI Publ., 2003. 32 p. (in Russian).
5. Reglamenti Optovogo rynka elektroenergii i moshchnosti [Regulation of the wholesale electricity and capacity market]. Non-profit Partnership “Market Council”: website. Available at: <http://www.en.np-sr.ru/abouttheelectricityindustry/abouttheindustry/generalinformation/> , accessed 31.01.2016.
6. Siitonen S., Holmberg H. Estimating the value of energy saving in industry by different cost allocation methods. *International Journal of Energy Research*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 324-334. DOI: [10.1002/er.1794](https://doi.org/10.1002/er.1794)
7. Deo-Jin Kim, Byung-Ryeal Choi. Cost Allocation of Electricity and Heat. *Advances in Energy Research*, 2011, vol. 5, pp. 271-309.
8. Khlebalin Yu.M. District heating and the second law of thermodynamics. *Vestnik SPbGU = Vestnik of Saint-Petersburg University*, 2011, no. 1, 3rd ed., pp. 94-101. (in Russian).
9. *Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 13 iyunya 2013 g. “Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazanii po raschetu udel'nykh raskhodov topliva na otpushchennuyu elektricheskuyu i teplovuyu energiyu v rezhime kombinirovannoi vyrabotki elektricheskoi i teplovoi energii, primenyaemykh v tselyakh tarifnogo regulirovaniya v sfere teplosnabzheniya”* [The order of the Ministry of energy of the Russian Federation of 13.06.2013 “About approval of methodical instructions on calculation of specific fuel consumptions on tempered electrical and heat energy in the mode of combined production of electricity and thermal energy, used for the purposes of tariff regulation in the sphere of heat supply”]. (in Russian).
10. *Federal'nyi zakon ot 27.07.2010 g. N 190-FZ “O teplosnabzhenii”* [Federal Law of 27.07.2010 N 190-FZ “About heat supply”]. (in Russian).
11. *Prikaz Ministerstva energetiki RF ot 30 dekabrya 2008 g. N 323 “Ob utverzhdenii poryadka opredeleniya normativov udel'nogo raskhoda topliva pri proizvodstve elektricheskoi i teplovoi energii”* [The order of the Ministry of energy of the Russian Federation of

- 30.12.2008 N 323 “About approval of the procedure of determining the ratios of specific fuel consumption in the production of electric and thermal energy”]. (in Russian).
12. *Conventional fuel*. Wikipedia. The Free Encyclopedia: website. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Условное_топливо , accessed 31.01.2016.
13. Kotas T.J. *The exergy method of thermal plant analysis*. Melbourne, Krieger Publishing Company, 1995. 322 p.
14. RD 34.08.552-95. Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu otcheta elektrostantsii i aktsionernogo obshchestva energetiki i elektrifikatsii o teplovoi ekonomichnosti oborudovaniya [Recommended Practices 34.08.552-95. Procedural Guidelines for Writing Reports of Electric Power Generating Stations and Energy Utility and Electrification Corporations on Thermal Efficiency of Equipment]. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, SPO ORGRES Publ., 1995. (in Russian).
15. RD 34.09.155-93. Metodicheskie ukazaniya po sostavleniyu i soderzhaniyu energeticheskikh kharakteristik oborudovaniya teplovykh elektrostantsii [Recommended Practices 34.09.155-93. Procedural Guidelines for Compiling and Maintaining Energy Characteristics of Thermal Power Plant Equipment]. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, SPO ORGRES Publ., 2000. (in Russian).
16. Chuchueva I.A., Inkina N.E. Optimization of Combine Heat and Power Plants in the Russian Wholesale Power Market Conditions. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 08, pp. 195-238. DOI: [10.7463/0815.0792934](https://doi.org/10.7463/0815.0792934) (in Russian).
17. Sin'kov V.M. *Optimizatsiya rezhimov energeticheskikh system* [Optimization of power systems]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1976. 307 p. (in Russian).