

*На правах рукописи*



СКУЛКИН Сергей Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК УЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТЭЦ И МИНИ-ТЭЦ**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

**Боровков Валерий Михайлович**

д.т.н., доцент

Сергеев Виталий Владимирович

Официальные оппоненты:

д.э.н., профессор

Косматов Эдуард Михайлович

к.т.н., доцент

Демидов Олег Игоревич

Ведущая организация:

ОАО «Территориальная  
генерирующая компания №1»

Защита состоится «24» мая 2011 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 552-6552

E-mail: [kg1210@mail.ru](mailto:kg1210@mail.ru)

Автореферат разослан 22 апреля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Григорьев К. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время для учета показателей ТЭЦ служит пропорциональный метод ОРГРЭС. Данный метод предназначен для определения удельных расходов топлива на производство и отпуск тепловой и электрической энергии в зависимости от энтальпии пара в теплофикационном отборе. Именно эти показатели применяются для анализа эффективности использования топлива на ТЭЦ и являются основой для тарификации отпускаемой электрической и тепловой энергии.

Такой подход к оценке эффективности ТЭЦ позволяет оперировать набором простых и наглядных показателей, однако, имеет ряд недостатков:

- метод ОРГРЭС предназначен для разделения расхода топлива только на паротурбинных ТЭЦ.
- метод дает представление об эффективности теплосиловой установки в целом, не выявляя неэффективные элементы и процессы. Вследствие этого, не всегда ясны причины снижения эффективности ТЭЦ;
- метод не учитывает второго начала термодинамики, что приводит к необъективной оценке термодинамической ценности отпускаемой тепловой энергии, по той же причине метод не дает объективной оценки необратимости протекающего процесса;

Эти же недостатки были присущи и физическому методу, применявшемуся до метода ОРГРЭС.

Существуют методики учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ, учитывающие второе начало термодинамики, которые могут эффективно применяться для термодинамического анализа ТЭЦ, но неприемлемы для разделения расходов топлива между двумя отпускаемыми видами энергии.

В связи с этим остро встает вопрос о формулировании актуальных требований к методике учета показателей ТЭЦ и о разработке методики или группы методик, отвечающих этим требованиям.

**Целью диссертационной работы** является разработка и обоснование универсальной методики учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ.

Задачи:

- Формулирование требований к универсальной методике учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ;
- Оценка существующих методов учета показателей ТЭЦ на предмет их соответствия заявленным требованиям;

- Разработка универсальной методики для учета эффективности использования топлива на ТЭЦ;
- Разработка приложения методики для оценки мероприятий по повышению эффективности использования топлива;
- Апробация методики и её приложений.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Показаны ограничения области применения существующих методов учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ;
- Исправлены недостатки энтропийного метода термодинамического анализа;
- Введено понятие субъективного удельного перерасхода топлива как характеристики потенциала экономии топлива;
- Разработаны приложения субъективного удельного перерасхода топлива для анализа окупаемости ремонтных работ;
- Предложен простой вариант расширения области применения пропорционального метода ОРГРЭС на все типы ТЭЦ.

**Практическая значимость работы:**

- Разработанная методика позволяет проводить комплексный анализ тепловой схемы ТЭЦ всех типов, включая мини-ТЭЦ;
- Понятие удельного перерасхода топлива является достаточным и наглядным критерием для сравнения эффективности использования топлива различными ТЭЦ;
- Приложения методики позволяют вычислять простой и дисконтированный сроки окупаемости и доходы от капиталовложений в ремонт и реконструкцию мест локализации эксергетических потерь в тепловой схеме ТЭЦ;
- Адаптированный метод ОРГРЭС позволяет находить показатели удельного расхода топлива на всех видах ТЭЦ с использованием единого подхода, что повышает достоверность сравнения ТЭЦ различных типов на основе показателей данного метода.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Технические требования к универсальной методике учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ;
- Обоснование недостатков энтропийного метода термодинамического анализа;

- Корректировка энтропийного метода: учет эксергии топлива при расчете расхода вводимой в установку эксергии; учет влияния места локализации эксергетических потерь на общий перерасход эксергии;
- Методика расчета полного и субъективного удельных перерасходов топлива на ТЭЦ на основе энтропийного метода;
- Приложения полного и субъективного перерасходов топлива для расчета сроков окупаемости ремонтных работ и для сравнения топливной составляющей эксплуатационных затрат;
- Простой вариант адаптации пропорционального метода ОРГРЭС ко всем типам ТЭЦ.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечиваются:

- Сопоставлением результатов применения откорректированного энтропийного метода с результатами эксергетического метода термодинамического анализа;
- Проверкой исходных данных по параметрам состояния рабочего тела в характерных точках тепловой схемы с помощью эксергетических КПД её узлов;
- Сравнением удельных расходов топлива с отчетными показателями ОАО РАО «ЕЭС России».

**Апробация и реализация результатов работы.** Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях «XXXVII неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2008 г.) и «XXXVIII неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2009 г.), на Международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2010 г.)

Разработанная методика была применена для термодинамического анализа тепловых схем паротурбинного энергоблока с турбиной ПТ 80/100 – 130/13 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2; парогазового энергоблока № 1 ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга. Были найдены неэффективные узлы, разработаны предложения по их ремонту и выполнен расчет окупаемости ремонтных работ в зависимости от ставки дисконтирования.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационной работы, разработке требований к универсальной методике анализа эффективности использования топлива на ТЭЦ,

совершенствовании существующих методов учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ, разработке универсальной методики анализа эффективности использования топлива на ТЭЦ, а также в разработке простого варианта адаптации пропорционального метода ОРГРЭС ко всем типам ТЭЦ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ. Основное научное содержание диссертационной работы отражено в 4 публикациях в научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературных источников, насчитывающего 90 наименований и приложения. Весь материал изложен на 135 страницах машинописного текста, содержит 13 рисунков и 23 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель, основные задачи исследования, выносимые на защиту положения, научная новизна, практическая значимость и апробация результатов работы.

**В первой главе** разработаны требования к методике анализа эффективности использования топлива на ТЭЦ:

1. Универсальность (область применения – все типы ТЭЦ и мини-ТЭЦ);
2. Наглядность показателей, единый критерий для сравнения эффективности использования топлива на ТЭЦ;
3. Соответствие всем законам термодинамики;
4. Возможность оценки как тепловой схемы в целом, так и любых её частей в целях выявления мест локализации эксергетических потерь
5. Определение необходимости и целесообразности ремонта оборудования, являющегося местом локализации эксергетических потерь;

На предмет соответствия заявленным требованиям проанализированы существующие методы учета показателей ТЭЦ: физический метод (метод МЭС), эксергетический и энтропийный методы, пропорциональный метод ОРГРЭС. Сформулированы основные преимущества и недостатки методов. Рассмотрены способы разделения расхода топлива между вырабатываемой тепловой и электрической энергией на основе физического, пропорционального и эксергетического методов.

Рассмотрены показатели эксергетического и энтропийного методов и сделан вывод об их соответствии первому и второму началам термодинамики. Среди показателей этих двух методов наиболее подходящим в качестве критерия эффективности использования топлива является удельный перерасход топлива на единицу отпуска эксергии. Он численно характеризует потенциал ресурсосбережения и может быть непосредственно связан с экономическими факторами.

Тем не менее, в выражениях энтропийного метода для вычисления удельных перерасходов топлива есть несколько дискуссионных моментов:

- вводимая в установку эксергия характеризуется низшей теплотой сгорания рабочей массы топлива. В общем случае низшая теплота сгорания не равна эксергии топлива, что снижает достоверность результатов;
- используется понятия условного топлива, которое включает в себя только низшую теплоту сгорания, и не характеризует эксергетическую ценность топлива;
- не отражено влияние места локализации эксергетических потерь на экономичность ТЭЦ;
- считается, что объективные факторы (температура наружного воздуха, марка топлива,  $\cos \varphi$  влияют не только на перерасход топлива, но и на коэффициент термодинамического совершенства установки.

**Во второй главе** рассмотрены аспекты практического применения существующих методов. С помощью существующих методов выполнен термодинамический анализ паротурбинного энергоблока с турбиной ПТ 80/100 – 130/13 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, парогазового энергоблока ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга, паротурбинной мини-ТЭЦ ПТГ-3500 и газопоршневой мини-ТЭЦ. На основе результатов каждого из методов выполнено сравнение экономичности ТЭЦ. Результаты, выраженные одним показателем (эксергетический КПД, коэффициент использования топлива, коэффициент эксергетических потерь, коэффициент термодинамического совершенства), представлены в виде диаграмм на рис. 1 – 4. Результаты, выраженные двумя показателями – удельными расходами топлива на отпуск тепловой и электрической энергии, для удобства сопоставления, сведены в табл. 1 – 2.

Эксергетический КПД установки и полный коэффициент термодинамического совершенства совпадают по физическому смыслу, но принимают разные численные значения. Это различие обусловлено недостатками энтропийного метода, рассмотренными в первой главе.

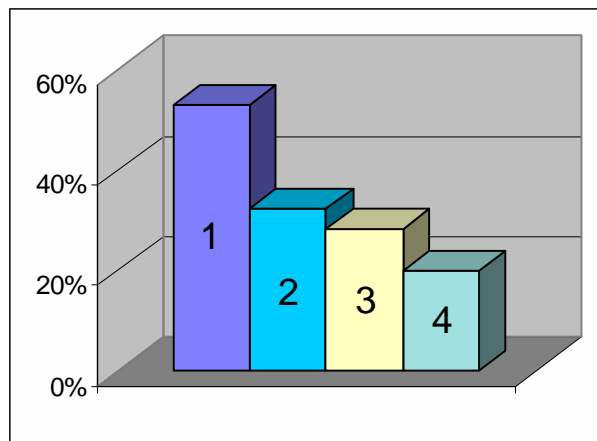


Рис. 1. Сравнение термодинамического качества ТЭЦ на основе эксергетического КПД: 1 – ПГУ-450Т; 2 – ПТ-80/100 – 130/13; мини-ГПА PG 1250В; мини-ПСУ ПТГ-3500

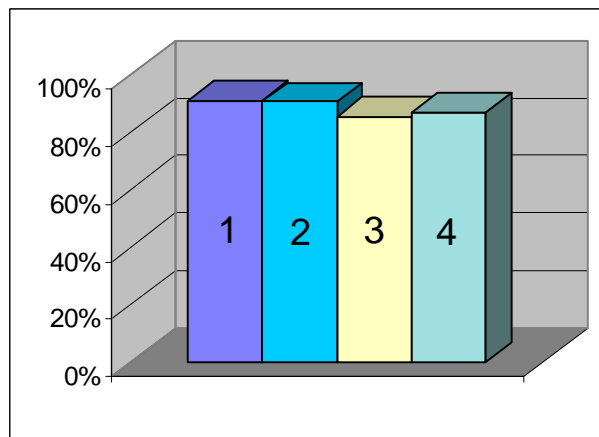


Рис. 2. Сравнение термодинамического качества ТЭЦ на основе коэффициента использования топлива: обозначения 1-4 как на рис. 1.

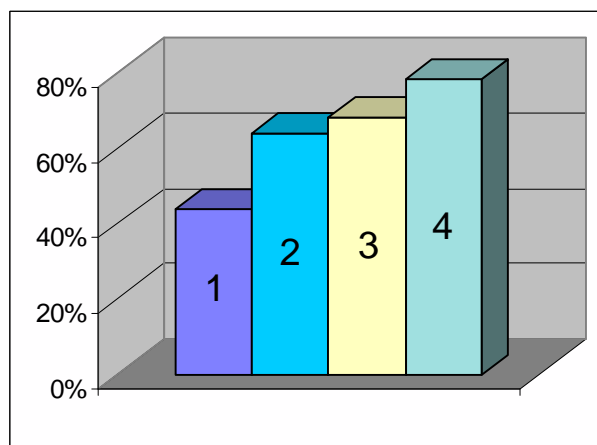


Рис. 3. Сравнение термодинамического качества ТЭЦ на основе полного коэффициента эксергетических потерь: обозначения 1-4 как на рис. 1

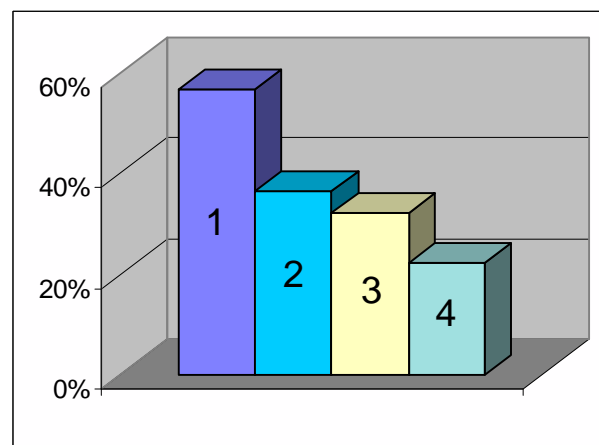


Рис. 4. Сравнение термодинамического качества ТЭЦ на основе коэффициента термодинамического совершенства: обозначения 1-4 как на рис. 1.

Показано, что удельные расходы топлива на производство электрической и тепловой энергии в меньшей степени определяются совершенством установки, в большей степени – применяемым для их расчета методом, и, кроме того, зависят от величин выработки и отпуска



электрической и тепловой энергии. По этим причинам удельные расходы топлива не являются достаточными показателями эффективности использования топлива на ТЭЦ.

Таблица 1

Удельные расходы условного топлива на отпуск тепловой энергии на ТЭЦ различных типов

Метод	Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии, кг у.т./Гкал			
	ПГУ	ПТУ	мини-ГПУ	мини-ПТУ
Физический	160,0	163,0	166,0	169,5
Пропорциональный	115,5	130,4	141,3	145,6
Эксергетический	69,4	87,4	89,8	96,5

Таблица 2

Удельные расходы условного топлива на отпуск электрической энергии на ТЭЦ различных типов

Метод	Удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии, г у.т./кВт*ч			
	ПГУ	ПТУ	мини-ГПУ	мини-ПТУ
Физический	204,3	290,8	320,0	325,5
Пропорциональный	220,5	329,4	333,5	339,1
Эксергетический	269,6	360,5	369,3	394,0

Расширена область применения пропорционального метода ОРГРЭС на все типы ТЭЦ, расчет удельных расходов выполнен по адаптированному методу. Обоснование адаптированного метода приведено в четвертой главе.

**В третьей главе** разработана термодинамическая методика, основанная на положениях энтропийного метода.

Методика включает в себя следующие этапы:

1. Расчет удельных перерасходов топлива в тепловой схеме и её частях;
2. Разделение удельных перерасходов по причинам их возникновения на номинальные, объективные и субъективные. Субъективный удельный перерасход в элементе указывает на его неисправность и численно характеризует потенциал экономии топлива;

3. Прогнозирование отпуска эксергии от ТЭЦ на определенный период времени для расчета абсолютной величины перерасходов топлива;
4. Вычисление срока окупаемости и дохода в результате реализации потенциала экономии топлива.

**Этап 1.** Расчет удельных перерасходов топлива выполняется по энтропийному методу. Разработаны предложения по корректировке энтропийного метода в части определения эксергии, подведенной в установку и отведенной от нее. Для учета подводимой эксергии введено понятие эксергетического эквивалента топлива  $E^{экв.} = 27400 \text{ кДж} / \text{кг э.т.}$ . На основе формул Ранга для приближенного определения эксергетической ценности топлива составлены упрощенные формулы для перевода расхода реального топлива в расход эксергетического эквивалента:

– для твердого топлива:

$$B_{ex}^{экв.} = \frac{B \cdot Q_p^B \cdot (1 - W)}{E^{экв.}}, \text{ кДж} / \text{кг э.экв.}; \quad (1)$$

– для жидких видов топлива:

$$B_{ex}^{экв.} = \frac{B \cdot Q_p^B \cdot 0,975}{E^{экв.}}, \text{ кДж} / \text{кг э.экв.}; \quad (2)$$

– для газообразного топлива (содержание  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  менее 10%):

$$B_{ex}^{экв.} = \frac{B \cdot Q_p^B \cdot 0,95}{E^{экв.}}, \text{ кДж} / \text{кг э.экв.}; \quad (3)$$

– для газообразного топлива (содержание  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  более 10%):

$$B_{ex}^{экв.} = \frac{B \cdot (Q_p^B - T_{o.c} \cdot (\sum S_j M_j - \sum S_i M_i))}{E^{экв.}}, \text{ кДж} / \text{кг э.экв.}, \quad (4)$$

где  $(\sum S_j M_j - \sum S_i M_i)$  – «энтропия девальвации», представляющая собой разницу энтропий топлива с окислителем и продуктов сгорания.

Для учета отводимой эксергии использовано понятие эксергетической мощности ТЭЦ:

$$E_{ТЭЦ} = 3,6 \cdot W + \sum_{i=1}^n E_i, \text{ ГДж} / \text{ч}, \quad (5)$$

где  $W$  – суммарная электрическая мощность генераторов ТЭЦ, МВт;

$n$  – количество отборов теплоносителя разных параметров;

$i$  – номер теплофикационного отбора теплоносителя;

$E_i$  – эксергетическая мощность  $i$ -го отбора теплоносителя, ГДж/ч;

$$E_i = G_i \cdot (h_i^{омб} - h_i^к - T_{O.C} \cdot (S_i^{омб} - S_i^к)) \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где  $G_i$  – массовый расход теплоносителя  $i$ -го отбора, т/ч;

$h_i^{омб}$ ;  $S_i^{омб}$  – энтальпия и энтропия теплоносителя  $i$ -го отбора, ккал/кг; ккал/(кг·К);

$h_i^к$ ;  $S_i^к$  – энтальпия и энтропия конденсата (возврата)  $i$ -го отбора, ккал/кг; ккал/(кг·К);

$T_{O.C}$  – температура окружающей среды, К.

С учетом корректировки подхода к определению подводимой и отводимой эксергии, формула коэффициента эксергетических потерь принимает вид:

$$\Omega = 1 - \frac{E_{TЭЦ}}{B_{ex}^{экв.} \cdot E^{экв.}} \quad (7)$$

Достоверность откорректированного энтропийного метода подтверждается равенством коэффициента термодинамического совершенства полному эксергетическому КПД, вычисленному по эксергетической методике:  $h_{ex} = 1 - \Omega$ .

Зная коэффициент эксергетических потерь, можно выразить значение удельного перерасхода эксергетического эквивалента топлива:

$$b_{II}^{экв.} = b^{экв.} - b_{II}^{экв.} = \frac{1}{E^{экв.} \cdot (1 - \Omega)} - \frac{1}{E^{экв.}} = \frac{1}{E^{экв.}} \cdot \frac{\Omega}{1 - \Omega} = \frac{1}{E^{экв.}} \cdot \frac{\Omega}{h_c} \quad (8)$$

Полученная величина удельного перерасхода количественно характеризует сумму необратимостей в теплосиловой установке, как бесполезную потерю топлива, принятого за эксергетический эквивалент. Эту потерю для удобства анализа можно выразить в удельных перерасходах как условного, так и реального топлива:

$$b_{II}^{y.T.} = \frac{\Omega}{Q_{p(y.m.)}^H \cdot (1 - \Omega)}; \quad (9) \quad b_{II}^{факт.} = \frac{\Omega}{Q_p^H \cdot (1 - \Omega)} \quad (10)$$

Строго говоря, необратимости приводят к перерасходу эксергии, а не топлива. Разные сорта реального топлива обладают различной эксергетической ценностью, следовательно, удельный перерасход реального топлива зависит не только от термодинамического качества установки, но и от сжигаемого топлива.

**Этап 2.** Показатель удельного перерасхода топлива является характеристикой, сравнивающей реальную теплосиловую установку с идеальной. Любой реальной установке присущи собственные потери эксергии, обусловленные технологией процесса. Для определения потенциала сбережения топлива следует сравнивать удельный расход реальной установки с аналогичной, полностью исправной.

Для разделения удельных перерасходов топлива по причинам их возникновения использован способ, предложенный Захаровым Н.Д. Согласно ему, удельный перерасход топлива в общем виде представляет собой сумму номинальных, объективных и субъективных потерь:

$$b_{\Pi} = b_{\Pi}^{HOM} + b_{\Pi}^{OB} + b_{\Pi}^{CVB} \quad (11)$$

Величина номинального удельного перерасхода топлива  $b_{\Pi}^{HOM}$  обусловлена собственными эксергетическими потерями установки. Определяется в результате термодинамического анализа энтропийным методом тепловой схемы при подстановке данных о состоянии рабочего тела в её характерных точках из ТЭХ или гарантийных показателей оборудования, заявленных заводом-изготовителем (проектировщиком).

Величина объективного удельного перерасхода топлива  $b_{\Pi}^{OB}$  обусловлена отклонениями условий подвода и отвода эксергии от условий проведения гарантийных испытаний. Определяется таким же способом, но с учетом поправок к расходам воды и пара согласно ТЭХ. Для несерийного и нового оборудования, для которого ТЭХ не были разработаны, в диссертации выведены следующие зависимости перерасхода топлива от объективных причин:

- Изменение температуры окружающей среды. Связанное с ним изменение эксергетической мощности ТЭЦ:

$$\Delta E_{TЭЦ} = \Delta T_{O.C} \cdot \sum_{i=1}^n G_i \cdot (S_i^{om\bar{o}} - S_i^{\kappa}); \quad (12)$$

Изменение эксергетической мощности сопровождается объективным изменением коэффициента эксергетических потерь на величину  $\Delta\Omega$ :

$$\Delta\Omega = 1 - \frac{\Delta T_{O.C} \cdot \sum_{i=1}^n G_i \cdot (S_i^{om\bar{o}} - S_i^{\kappa})}{B_{ex}^{эkv.} \cdot E^{эkv.}}; \quad (13)$$

Соответствующий ему удельный перерасход топлива:

$$b_{НОМ}^1 = \frac{1}{E^{эkv.}} \cdot \frac{\Delta\Omega}{1 - \Delta\Omega} \quad (14)$$

- Изменение коэффициента мощности. Снижение  $\cos j$  ведет к росту затрат эксергии на входе в установку, что, в свою очередь, приводит к росту потерь эксергии во всех предшествующих последовательно соединенных элементах установки.

Например, в ПСУ с функцией теплофикации изменится поток эксергии через все элементы, кроме теплофикационной установки. Изменение эксергии на входе в установку составит:

$$\Delta E_{BX} = \frac{3,6 \cdot W}{1 - \Omega + \Omega_{TY}} = \frac{3,6 \cdot W}{\Delta \cos j \cdot (\Omega - \Omega_{TY} - 1)} \quad (15)$$

При этом коэффициент эксергетических потерь останется прежним, но меняется перерасход топлива:

$$b_{НОМ}^2 = \frac{\Delta E_{BX}}{E^{эkv.} \cdot E_{ТЭЦ}} \quad (16)$$

- Изменение марки топлива. Удельный перерасход равен разности удельных расходов проектного и заменяющего топлива:

$$b_{НОМ}^3 = \frac{(B^{np.} - B^{зам.}) \cdot \Omega}{E_{ТЭЦ}} \quad (17)$$

Результатом второго этапа является получение величины удельного субъективного перерасхода топлива:

$$b_{П}^{СУБ} = b_{П} - \sum b_{П}^{НОМ} - b_{П}^{ОБ} \quad (18)$$

Найденная величина  $b_{П}^{СУБ}$  представляет собой расход топлива, излишне затраченный на производство единицы отпущенной эксергии.

**Этап 3.** Для расчета абсолютной величины перерасхода топлива за определенный промежуток времени требуется прогнозирование величины отпуска эксергии.

Для определения загрузки оборудования ТЭЦ введен коэффициент использования установленной мощности ТЭЦ  $z$ , равный отношению текущего значения эксергетической мощности ТЭЦ к установленной эксергетической мощности.

При работе ТЭЦ по тепловому графику изменение коэффициента использования установленной мощности происходит по погодозависимому графику. Тепловая нагрузка зависит от температуры наружного воздуха, а электрическая мощность принимается по типовой энергетической характеристике с учетом вентиляционного пропуска пара в конденсатор:

$$N_T = w_T \cdot (Q_T - Q_{T.X.}), \text{ MВт} \quad (19)$$

На рис. 5 изображен график изменения коэффициента использования установленной мощности для ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.

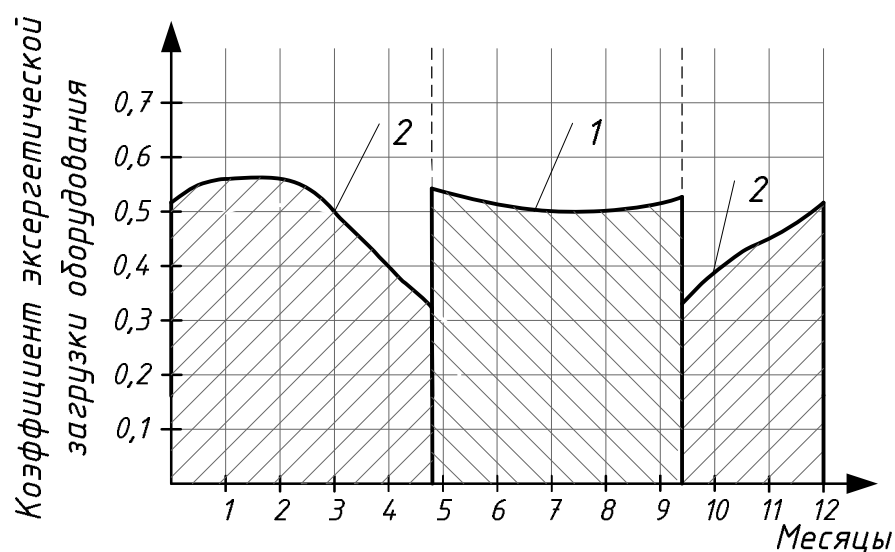


Рис. 5. Коэфф-т использования эксергетической мощности ТЭЦ г. Санкт-Петербурга при работе: 1 – по электрическому графику; 2 – по тепловому графику

При работе ТЭЦ по электрическому графику (как правило, в межотопительный период) тепловая мощность изменяется незначительно, а электрическая – задаётся энергосистемой. На этот период возможен прогноз отпуска эксергии на основе данных по эксплуатации за предыдущие годы. При повышении доли ГВС в общей подключенной нагрузке ТЭЦ возможен вариант круглогодичной работы ТЭЦ по тепловому графику.

Сначала следует определить годовой отпуск эксергии, перейти к четвертому этапу и выяснить, менее или более года составляет срок окупаемости ремонта анализируемого узла. Далее вернуться к третьему этапу и в зависимости от предполагаемого срока окупаемости выполнить прогнозирование отпуска эксергии по месяцам в течение года, либо по годам в течение срока службы оборудования.

**Этап 4.** На данном этапе следует определить срок окупаемости ремонтных работ по устранению эксергетических потерь. В результате замены (ремонта) узла расход топлива на единицу отпущенной эксергии снизится на величину субъективного удельного перерасхода топлива. За счет реализации тепловой и электрической энергии с меньшей себестоимостью будет получен доход.

$$ЧДД = \sum_{t=0}^{T_{OK}} \Delta_t \cdot (1 - E)^{-t} = 0 \quad (20)$$

где ЧДД – чистый дисконтированный доход;

$T_{OK}$  – период возмещения вложений средств за счет ликвидации субъективного перерасхода топлива.

Чистая прибыль  $E^t$  за период времени  $t$  определяется исходя из стоимости сэкономленного топлива:

$$ЧПPr^t = \left[ b_{II}^{j.суб.} + b_{II}^{j.суб.} \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^{j-1} \Omega_i \right) \right] \cdot C_{топл.} \cdot E_{ТЭЦ}^t, \quad (21)$$

где  $\left[ b_{II}^{j.суб.} + b_{II}^{j.суб.} \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^{j-1} \Omega_i \right) \right]$  – субъективный удельный перерасход

реального топлива в элементе тепловой схемы и связанный с ним прирост удельного перерасхода в других элементах, соединенных с ним последовательно и предшествующих ему, кг/кДж;

$C_{топл.}$  – цена топлива в период времени  $t$ ;

$E_{ТЭЦ}^t$  – отпуск эксергии ТЭЦ за период времени  $t$ .

Точность полученных результатов зависит от точности прогноза изменений цен на топливо, от изменений подключенной к ТЭЦ тепловой нагрузки, от случайных погодных аномалий, от заводского брака вновь устанавливаемого оборудования.

Представленная методика в полной мере отвечает требованиям, предъявленным к ней в первой главе диссертации.

На основе разработанной методики и рекомендаций по ее практическому применению выполнен расчет полного и субъективного удельных перерасходов топлива, выявлены места локализации субъективных эксергетических потерь. Наиболее существенным из них является система регенеративного подогрева ПСУ с турбиной ПТ 80/100–

130/13. Выполнен расчет простого и дисконтированного срока окупаемости ремонта системы регенеративных подогревателей и рассчитан размер ожидаемой чистой прибыли.

**В четвертой главе** разработан вариант адаптации пропорционального метода ОРГРЭС ко всем типам ТЭЦ. Главным недостатком действующего метода ОРГРЭС является его применимость только к паротурбинным ТЭЦ. Наличие второго рабочего тела (дымовых газов) методом не предусмотрено. Для его адаптации ко всем типам ТЭЦ достаточно учесть процессы, в которых выработка электроэнергии происходит за счет преобразования тепловой энергии дымовых газов, и процесс дожигания. Формулу для коэффициента ценности теплоты с учетом присутствия в теплосиловой установке двух рабочих тел, можно представить в общем виде:

$$x_i = \frac{h_{KV}^{\Gamma} + \Delta h_{дож}^{\Gamma} - h_{yx}^{\Gamma}}{h_0^{\Gamma} + \Delta h_{дож}^{\Gamma} - h_{yx}^{\Gamma}} \cdot \frac{h_{отб.i} + \Delta h_{nn} - h_{2k}}{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{2k}} \cdot \left( 1 + K \cdot \frac{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{отб.i}}{h_0 + \Delta h_{nn} - h_{2k}} \right), \quad (22)$$

где  $h_0^{\Gamma}$  – энтальпия дымовых газов на входе в газовую турбину или газопоршневой агрегат;

$\Delta h_{дож}^{\Gamma}$  – прирост энтальпии дымовых газов в результате дожигания;

$h_{KV}^{\Gamma}$  – энтальпия дымовых газов перед котлом-утилизатором;

$h_{yx}^{\Gamma}$  – энтальпия уходящих дымовых газов.

Также дополнена формула расхода тепла на производство электрической энергии:

$$Q_{Э}^0 = D_{ГТ(ГП)} \cdot (h_0^{\Gamma} - h_{KV}^{\Gamma} + h_{yx}^{\Gamma}) + D_0 \cdot h_0 + D_{ПП} \cdot (h'_{ЦСД} - h''_{ЦВД}) + G_{ВПР} \cdot (h'_{ЦСД} - h''_{ВПР}) - G_{ПВ} \cdot h_{ПВ} - Q_T + Q_{ПР} \quad (23)$$

где  $D_{ГТ(ГП)}$  – расход дымовых газов через газовую турбину (газопоршневой агрегат);

Все остальные обозначения соответствуют принятым в РД 34.08.552-95.

Остальные формулы метода ОРГРЭС могут применяться для анализа всех типов ТЭЦ без корректировки. Адаптированный метод был применен во второй главе для расчета удельных расходов топлива парогазового энергоблока № 1 ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ г. Санкт-Петербурга.



**В заключении** сформулированы выводы по результатам работы:

1. Разработаны требования к методике учета показателей ТЭЦ и мини-ТЭЦ;

2. Выполнена аналитическая оценка существующих методов учета показателей ТЭЦ на предмет их соответствия заявленным требованиям. Наиболее полно заявленным требованиям отвечает энтропийный метод. Однако в структуре метода выявлены недочеты в части определения вводимой и отводимой эксергии, в подходе к расчету влияния перерасхода в каком-либо агрегате на общую экономичности энергоблока;

3. Исправлены недочеты энтропийного метода. Разработана методика расчета потенциала экономии топлива при устранении субъективных эксергетических потерь. Исправлена и дополнена методика разделения удельных перерасходов топлива (для нового, нетипового и несерийного оборудования)

4. Предложен способ расчета простого и дисконтированного сроков окупаемости ремонтных работ, направленных на ликвидацию субъективных перерасходов топлива;

5. С помощью предложенной методики выполнен термодинамический анализ энергоблока с турбиной ПТ 80/100 – 130/13 Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, выявлено место локализации субъективного перерасхода топлива – система регенеративного подогрева. Выполнен расчет срока окупаемости ремонта системы регенеративного подогрева;

6. Достоверность изменений, внесенных в энтропийный метод, подтверждена сравнением его результатов с результатами эксергетического метода, чей термодинамический аппарат на данный момент является наиболее полно проработанным;

7. Результаты работы внедрены в ОАО «Территориальная генерирующая компания № 1» и в филиале «Северо-Западная ТЭЦ» ОАО «ИНТЕР РАО ЕЭС».

**Основное содержание диссертации отражено в публикациях, вышедших в изданиях из перечня ВАК:**

1. Боровков, В.М. Применение энтропийного и эксергетического методов для выявления мест локализации субъективных эксергетических потерь / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Надежность и безопасность энергетики. 2010. № 3. С. 27–30.

2. Боровков, В.М. Вариант адаптации метода ОРГРЭС к разделению расхода топлива на парогазовых ТЭЦ (на примере Северо-Западной ТЭЦ) / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Промышленная энергетика. 2010. № 9. С. 42–45.

3. Боровков, В.М. Анализ влияния пропорционального метода ОРГРЭС на развитие отечественной теплоэнергетики и вариант его модернизации / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Труды Академэнерго. 2010. № 3. С. 38–44.

4. Боровков, В.М. Эксергетический анализ тепловой схемы индивидуального теплового пункта на стадии проектирования / В.М. Боровков, С.В. Скулкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 3. С. 61–66.

**Материалы научных конференций:**

5. Скулкин, С. В. Метод учета показателей ОРГРЭС и второй закон термодинамики. // XXXVII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – 2009. С. 112 – 114.

6. Скулкин, С. В. Сравнение результативности энтропийного и эксергетического методов термодинамического анализа. // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – 2010. С. 106 – 108.

7. Скулкин, С. В. Анализ удельных расходов топлива парогазовой ТЭЦ с применением элементов метода ОРГРЭС. // Научному прогрессу – творчество молодых: Сборник материалов международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам: в 3 Ч. – Ч.2.- Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. С. 179 – 181.