

На правах рукописи



ЗЫКОВ
Сергей Владимирович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЭЦ

Специальность 05.14.14 - тепловые электрические станции, их
энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Щинников Павел Александрович

Официальные оппоненты: **Ротов Павел Валерьевич**,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ульяновский государственный
технический университет», профессор

Цепенюк Алексей Иванович,
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«ЗиО – КОТЭС», генеральный директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского
отделения Российской академии наук (ИСЭМ
СО РАН), г. Иркутск.

Защита диссертации состоится 20 октября 2017 года в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Чичиндаев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время на территории России функционирует 316 теплоэлектроцентралей, их общая электрическая мощность составляет около 90 ГВт, а тепловая 260 тыс. Гкал/ч.

Оборудование теплоэлектроцентралей представлено широкой линейкой от 25 МВт и меньше, до 250 МВт единичной мощности энергоблоков и турбоагрегатов. Часто одна электростанция имеет разнотипное оборудование и вынуждена обеспечивать разнородную нагрузку. С другой стороны, перед каждой станцией стоит задача снижения затрат на топливо, которая может обеспечиваться наивыгоднейшим сочетанием работающего оборудования и заданных нагрузок (тепловых и электрических). Таким образом, решение задачи оптимального распределения нагрузок обеспечивает повышение эффективности работы ТЭЦ.

В общем случае оптимизация режимов работы ТЭЦ является одной из наиболее сложных практических задач. В настоящее время трудами Горнштейна В. М., Андриющенко А.И., Аминова Р.З., Аракеляна Э. К., Клера А. М. Секретарева Ю. А., Веникова В. А., Басса М. С. и др. разработаны методики, которые различными способами находят удовлетворяющее заданному критерию распределение нагрузок, однако до сих пор нельзя сказать, что задача оптимизации режимов имеет однозначное решение. Сложность решаемой задачи обусловлена неопределенностью исходных данных по расчетным переменным, параметрам, ограничениям. Также, в расчетах необходимо учитывать, что ТЭЦ может иметь различную конфигурацию оборудования, различные параметры работы агрегатов, варианты исполнения тепловых схем и внешние условия функционирования.

Существующие методы обладают рядом недостатков, в числе которых устаревание исходной информации о характеристиках относительных приростов и условность разнесения топливных издержек при использовании в качестве критерия оптимизации экономических показателей. В работе для решения задачи оптимизации режимов работы ТЭЦ используется дифференциально-эксергетический метод, который позволяет избежать условности в разнесении топливных издержек, а разработанный программно-вычислительный комплекс позволяет проводить полный расчет схемы ТЭЦ каждый раз, при проведении процедуры оптимизации, что позволяет получать актуальные данные по эффективной загрузке оборудования ТЭЦ.

Применение подходов и результатов, полученных в данной работе позволит проводить оптимизационные расчеты как существующих так и вновь проектируемых ТЭЦ с различным составом оборудования и оперативно получать рекомендации по ведению режима.

Целью работы является повышение эффективности работы ТЭЦ с различным составом оборудования, путем оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузки.

Задачи работы:

1. Разработка методики повышения эффективности работы ТЭЦ путем оптимизации режимов работы на базе дифференциального эксергетического метода.
2. Разработка программно-вычислительного комплекса (ПВК) на основе методики оптимизации ТЭЦ.
3. Анализ работы реально функционирующих ТЭЦ с различным составом оборудования и выработка рекомендации по фактической загрузке оборудования за счет применения ПВК.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые разработана методика оптимизации режимов работы ТЭЦ на основе дифференциально-эксергетического подхода, которая опирается на эксергетическую функцию цели, включает алгоритм расчета тепловой схемы и учитывает внутренние и внешние ограничения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение эксергетической функции цели для решения задачи оптимизации режимов.
2. Методика распределения нагрузки между энергоблоками ТЭЦ различного состава и алгоритм оптимизации режимов работы ТЭЦ.
3. Программно-вычислительный комплекс «СНРР», включающий пакеты по процедуре оптимизации, расчету тепловой схемы энергоблоков, расчету свойств воды и водяного пара, работе с базой данных, взаимодействию с пользователем.
4. Результаты оптимизационных расчетов по распределению нагрузки агрегатов ТЭЦ разного состава и мощности.
5. Анализ устойчивости оптимальных нагрузок типовых энергоблоков работающих в составе ТЭЦ.

Методы исследования: математическое и компьютерное моделирование ТЭЦ, метод дифференциально-эксергетического анализа, методы материальных, энергетических и эксергетических балансов, методы термодинамического анализа.

Практическая значимость работы: разработана методика, математическая модель и программно-вычислительный комплекс. Полученные в данной работе данные могут быть использованы в качестве рекомендации по ведению режима эксплуатационным персоналом электростанций. Разработанная математическая модель и программа расчета может использоваться для анализа режимов работы, как функционирующих электростанций, так и вновь проектируемых.

Личный вклад: все результаты, представленные без ссылок на другие источники, получены автором.

Достоверность полученных данных обосновывается использованием апробированных методов эксергетического анализа и фундаментальных законов термодинамики. Для всех полученных выводов приведены численные

данные по результатам моделирования и компьютерных экспериментов. Используются данные полученные на реально функционирующих ТЭЦ.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на 12 международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, 2014); IV российской молодежной научной школо-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» (Томск, 2016); Всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (Новосибирск, 2014, 2016); научных семинарах НГТУ (2014-2017).

По материалам диссертации опубликовано 18 печатных трудов, в том числе: в рецензируемых журналах – 5 (из них по перечню ВАК – 5); свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ – 5; в сборниках научных трудов и по материалам конференций – 8.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 126 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 118 страниц и содержит 47 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** обосновывается актуальность задачи повышения эффективности ТЭЦ путем оптимизации режимов ее работы. Рассмотрены современные подходы к решению задачи. Проанализированы существующие методы оптимизации режимов работы. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе** обосновывается применение эксергетической функции цели при оптимальном распределении нагрузки между энергоблоками ТЭЦ. Показано, что эксергетическая функция цели термодинамически строго оценивает эффективность при оптимизации режимов ТЭЦ и учитывает технологические взаимосвязи между функционирующими частями (энергетическими системами и агрегатами) энергоблока, а также внешние связи. Приводится принципиальный алгоритм эксергетической оптимизации.

Предлагаемый дифференциально-эксергетический подход опирается на работы представителей научной школы Новосибирского государственного технического университета в лице Ноздренко Г.В., Щинникова П.А., Овчинниова Ю.В., Боруш О.В., Григорьевой О.К., Ловцова А.А., Бородихина И.В. и других. В этом подходе энергоблок необходимо разделить на функционирующие части или подсистемы, в соответствии с рисунком 1: топливообеспечения (0), парогенератора со всеми его энергетическими системами (1); ЧВД (2) и ЧСНД (3) турбины; электрического генератора и оборудования (4); технического водоснабжения и регенерации (5); отпуска

теплоэксергии потребителю (6). Далее тепловая схема энергоблока представляется в виде эксергетической структурной схемы подсистем.

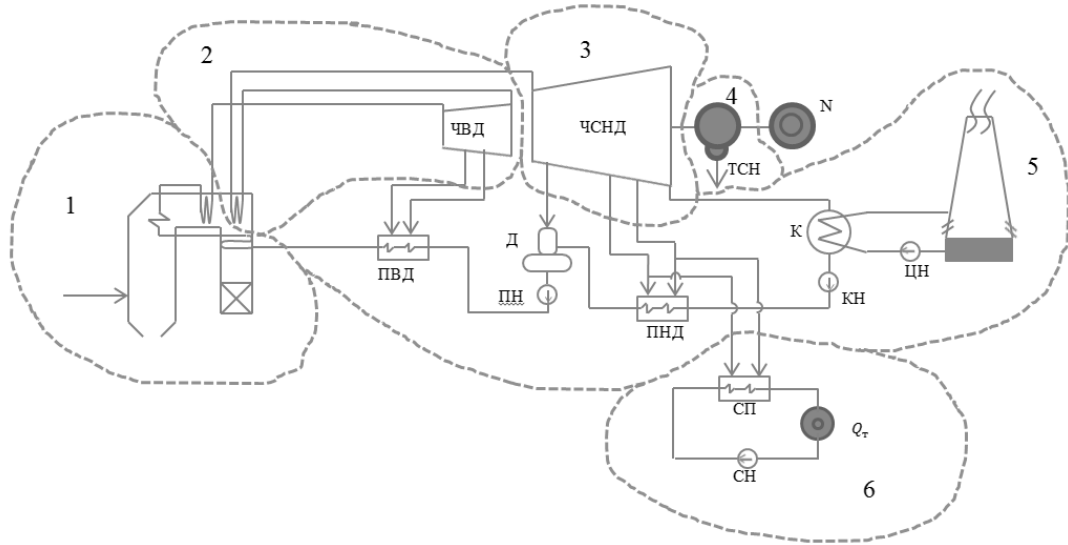


Рисунок 1 - Разбиение тепловой схемы энергоблока на подсистемы

Эксергетическая эффективность подсистем определяется как:

$$\eta_i = \frac{E_i^y}{E_i^x}, \quad (1)$$

$$E_i^x = \sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x; E_i^y = \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y, \quad (2)$$

E_{ki}^x, E_{ij}^y - эксергетические производительности функционирующей части, где E_{ki}^x - эксергия, подводимая к функционирующей части с k -ым энергоносителем по i -му каналу связи; E_{ij}^y - эксергия, отводимая с i -ым энергоносителем по j -му каналу связи. i - индекс подсистемы; x - обозначение входящего потока эксергии; y - обозначение выходящего потока эксергии.

Эксергетические КПД по отпуску:

- электроэнергии:

$$\eta_{4N} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N, \quad (3)$$

- теплоэксергии

$$\eta_{6T} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N, \quad (4)$$

ε_S - структурный коэффициент эксергетических связей, учитывающий технологические взаимосвязи между функционирующими частями (энергетическими системами и агрегатами) энергоблока, а также внешние системные связи; ε_N эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате.

При этом должны соблюдаться следующие ограничения, обусловленные необратимостью процессов в соответствии со вторым законом термодинамики:

$$E_i^y \geq 0; E_i^x > 0; E_i^y \leq E_i^x. \quad (5)$$

Интегральный эксергетический КПД энергоблока определяют по выражению:

$$\eta_e = \frac{\eta_N N + \eta_T E_T}{N + E_T} \quad (6)$$

Эксергетический КПД ТЭЦ как критерий эффективности, при оптимальном распределении нагрузки между энергоблоками функционирования ТЭЦ:

$$\tilde{\eta}_z = \frac{\sum_n \eta_e (N + E_T)}{\sum_n N + E_T}, \quad (7)$$

где n – число энергоблоков на ТЭЦ.

Оптимизатор представлен как:

$$\left\{ \min_{x \in R^n} [\tilde{\eta}_z(x)]^{-1} \mid [\bar{\varphi}_u(\omega) = 0, u \in U] \right\}, \quad (8)$$

где $\bar{\varphi}_u(\omega)$ – логико-числовой оператор функциональных отношений; U – множество логико-числовых операторов; $\omega = (x, \Gamma, G, R^n, L)$ – информационная структура; Γ – множество энергоблоков; L – множество логических управляющих параметров; G – множество внешних связей и исходных данных; x – параметры и характеристики энергоблоков. R^n – многомерное вещественное пространство, включающее все независимые и зависимые переменные.

Условия поиска оптимума состоят в том, что пространство R^n – замкнуто, а допустимая область не пуста и содержит такие значения x , при которых выполняются уравнения балансов:

$$\text{- материального:} \quad \sum_{k \in V(i)} M_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} M_{ij}^y = 0; \quad (9)$$

$$\text{- эксергетического:} \quad \sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y \eta_i^{-1} = 0. \quad (10)$$

Здесь M , h – расход и энтальпия энергоносителя; η – коэффициент, учитывающий соответствующие потери.

Рассмотрим процедуру расчетов на примере ТЭЦ с восемью эквивалентными энергоблоками, в соответствии с рисунком 2. Для каждого расчетного режима обеспечивают постоянство суммарной нагрузки ТЭЦ по отпуску электроэнергии и теплоты:

$$N_{\text{ТЭЦ}} = \sum_{i=1}^8 N_i = \text{const} \quad (11)$$

$$Q_{\text{ТЭЦ}} = \sum_{i=1}^8 Q_i = \text{const}$$

Электрическую и тепловую нагрузку каждого i -го энергоблока задают случайным образом в каждой итерации расчетов так, чтобы обеспечить условие (11). При этом диапазон возможных нагрузок i -го энергоблока задается в технически возможных пределах:

$$\begin{aligned} N_i^{min} &\leq N_i \leq N_i^{max}; \\ Q_i^{min} &\leq Q_i \leq Q_i^{max}; \end{aligned} \quad (12)$$

В этих выражениях минимальные и максимальные значения обусловлены фактическим состоянием оборудования.

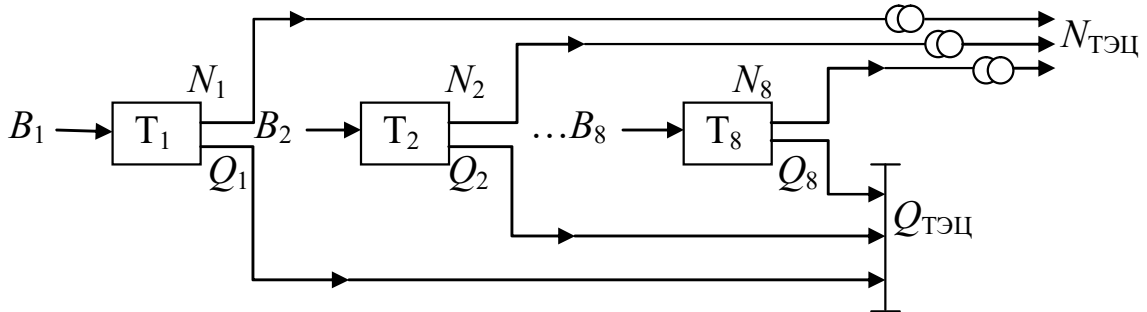


Рисунок 2 - Принципиальная схема энергоснабжения от ТЭЦ:

B_1, B_2, \dots, B_8 – расходы топлива на теплофикационные энергоблоки; T_1, T_2, \dots, T_8 – теплофикационные энергоблоки; N_1, N_2, \dots, N_8 – электрические нагрузки теплофикационных энергоблоков;
 Q_1, Q_2, \dots, Q_8 – теплофикационные нагрузки энергоблоков;
 $N_{ТЭЦ}, Q_{ТЭЦ}$ – электрическая и теплофикационная нагрузки ТЭЦ

В общем случае термодинамические параметры эквивалентных энергоблоков отражают их фактические значения:

$$\left. \begin{array}{l} P_0 \\ t_0 \\ P_{пп} \\ t_{пп} \\ t_{пв} \\ \alpha_{ТЭЦ} \\ \Delta t \\ t_{охл} \end{array} \right\} const, \quad (13)$$

где P_0 – давление свежего пара, МПа; t_0 – температура свежего пара, °С; $P_{пп}$ – давление пара промперегрева, МПа; $t_{пп}$ – температура пара промперегрева, °С; $\alpha_{ТЭЦ}$ – коэффициент теплофикации; Δt – температурный напор в конденсаторе, °С; $t_{охл}$ – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, °С.

Вместе с тем предусмотрена возможность индивидуальной настройки программного комплекса на отдельный энергоблок (работающий в рамках ТЭЦ), когда:

$$\begin{aligned}
P_{0i}^{min} &\leq P_{0i} \leq P_{0i}^{max} \\
t_{0i}^{min} &\leq t_{0i} \leq t_{0i}^{max} \\
P_{ппi}^{min} &\leq P_{ппi} \leq P_{ппi}^{max} \\
t_{ппi}^{min} &\leq t_{ппi} \leq t_{ппi}^{max} \\
t_{пви}^{min} &\leq t_{пви} \leq t_{пви}^{max} \\
\alpha_{тэци}^{min} &\leq \alpha_{тэци} \leq \alpha_{тэци}^{max} \\
\Delta t_i^{min} &\leq \Delta t_i \leq \Delta t_i^{max} \\
t_{охли}^{min} &\leq t_{охли} \leq t_{охли}^{max}
\end{aligned} \tag{14}$$

Диапазон изменения термодинамических параметров обусловлен неопределенностью в информационном обеспечении конкретного энергоблока. В этом случае программа расчетов проведет некоторое согласование балансовых уравнений и определит наиболее вероятное термодинамическое значение параметра при минимальном расходе топлива и заданной мощности.

Таким образом, методика включает внутренние и внешние ограничения, где под внутренними понимают ограничения термодинамического цикла и вида тепловой схемы, а под внешними – ограничения по нагрузке ТЭЦ и энергоблоков.

В качестве начальной точки отсчёта X_0 электрическая и тепловая нагрузки ТЭЦ распределяются пропорционально номинальным электрической и тепловой мощностям функционирующих энергоблоков. В окрестностях точки определяется несколько значений функции $[\tilde{\eta}_z(x)]^{-1}$, на основании которых вычисляется новая точка X_1 . Направления изменения компонентов X задаются случайными числами, все направления равновероятны, а движение к экстремуму осуществляется только тогда, когда результат данного случайного движения приводит к уменьшению функции цели.

Кроме того, для энергоблока определяют температуру окружающего воздуха, для которой рассчитывается температурный и тепловой графики нагрузки при заданном коэффициенте теплофикации, температуре прямой и обратной сетевой воды, давлении пара в Т-отборе. Для известных (на данном шаге расчета) термодинамических параметров рассчитывается тепловая схема энергоблока и функционально зависимые параметры. Для каждого расчетного варианта тепловой схемы энергоблока выполняются с совместной увязкой: тепловые и балансовые расчеты котла, турбины, регенеративных и сетевых подогревателей, конденсатора, технических систем; расчет мощности собственных нужд; определение расходов топлива.

В целом разработанная расчетная схема представляет собой совокупность математических моделей элементов (групп элементов) реально функционирующего энергоблока со связями. Модели включают зависимости между входными и выходными расходно-термодинамическими параметрами, а также зависимости между этими параметрами и эксергетическими

характеристиками элементов, проверку параметров по всем видам ограничений, проверку допустимости расчетных значений (неотрицательность расходов, энергетических и материальных потоков и т.д.). Все модели функционирующих частей согласованы между собой по входным параметрам.

Глава 3 посвящена разработке программно-вычислительного комплекса «СНРР», при помощи которого производится минимизация $[\tilde{\eta}_z(x)]^{-1}$. В комплексе введены процедуры распределения нагрузки между энергоблоками различной мощности и различного состава оборудования ТЭЦ, в соответствии с рисунком 3.

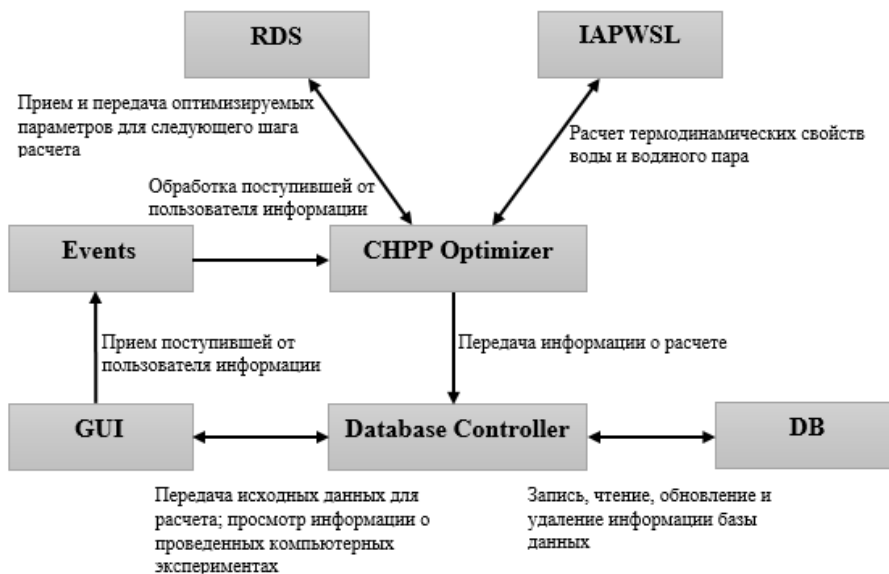


Рисунок 3 - Взаимоотношение между компонентами программы СНРР Optimizer

Исходными данными для расчетов являются значения множества $x \in X$ в виде давления и температуры острого пара и пара промперегрева, температуры питательной воды, охлаждающей воды и наружного воздуха, коэффициента теплофикации, электрических и тепловых нагрузок.

Проведена настройка программного комплекса с учетом графиков тепловых нагрузок для ТЭЦ мощностью 300 МВт, при этом установлено, что повышение эффективности при оптимизации нагрузок агрегатов ТЭЦ может составлять 1,5-3% по сравнению с пропорциональной нагрузкой оборудования, в соответствии с рисунком 4. При этом меньшие значения соответствуют меньшим тепловым и электрическим нагрузкам ТЭЦ. Экономия топлива при этом может составлять 0,02-0,07 кг/с.

Показано, что наибольший эффект от оптимизации нагрузок агрегатов ТЭЦ может быть обеспечен при нагрузках ТЭЦ в диапазоне 0,6-0,8 от максимальных значений.

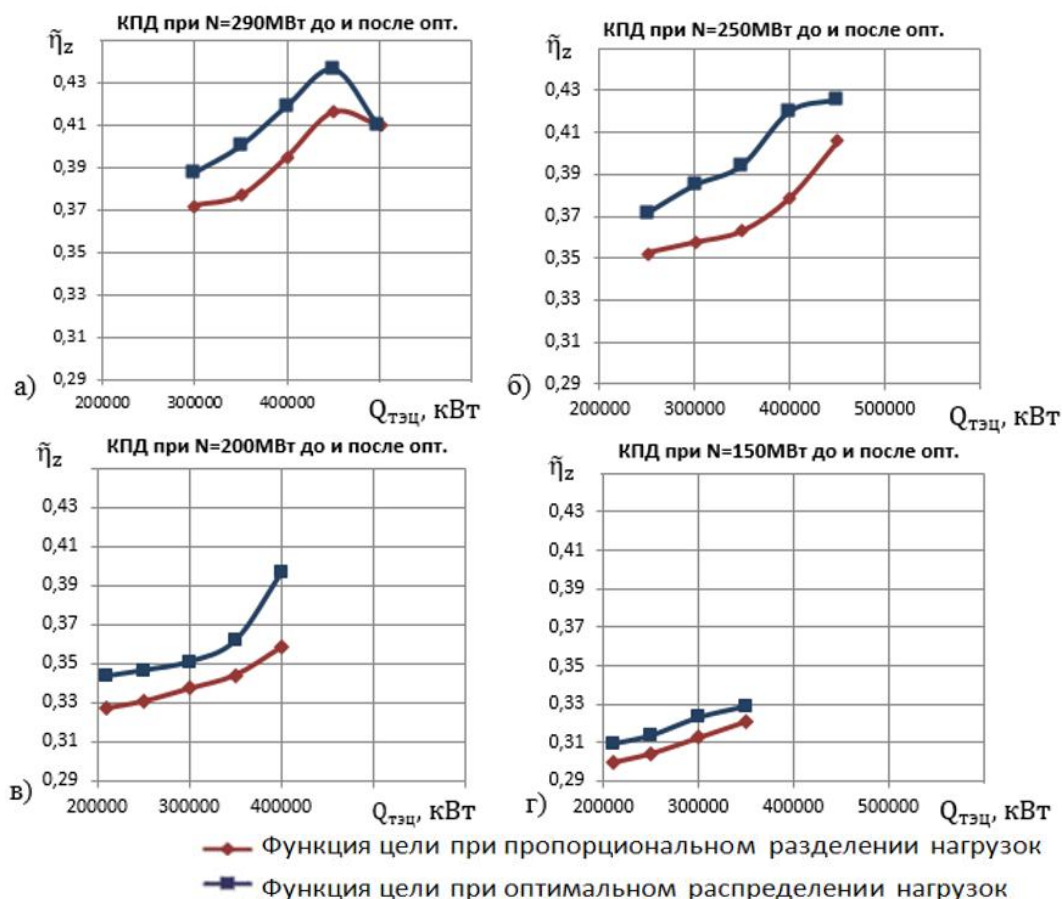


Рисунок 4 - Эксергетический КПД ТЭЦ на различных режимах: а – при отпускаемой электрической мощности $N_{ТЭЦ}=290$ МВт; б – при отпускаемой эл. мощности $N_{ТЭЦ}=250$ МВт; в – при отпускаемой электрической мощности $N_{ТЭЦ}=200$ МВт; г – при отпускаемой электрической мощности $N_{ТЭЦ}=150$ МВт;

Проведена оценка устойчивости оптимальных решений при которой выявлено, что суммарный эффект при оптимизации ТЭЦ может составлять более 1,5% при снижении (ухудшении) параметров работы отдельных энергоблоков, что обеспечивает экономию топлива 0,14-0,47 кг/с по ТЭЦ в целом. При этом показано, что проведение процедуры оптимизации режимов при снижении термодинамических параметров на некоторых энергоблоках на ~2% и снижении эффективности работы блока на 0,3-0,4%, позволяет обеспечить суммарный КПД ТЭЦ на 1,5-5% выше, чем на тех же энергоблоках, работающих на номинальных параметрах, но без проведения оптимизации при пропорциональном распределении нагрузок.

В четвертой главе проведены оптимизационные расчеты для Новосибирской ТЭЦ-2 в составе трех котлов производительностью 170 т/ч, четырех котлов производительностью 420 т/ч, трех турбин Т-20, двух турбин ПТ-65 и двух турбин ПТ-80 и для Бийской ТЭЦ в составе пяти котлов производительностью 210 т/ч, трех котлов 430 т/ч, трех турбин ПТ-50, одной турбины Т-100 и двух турбин Т-110. Оптимизационные расчеты проведены с разделением режимов на зимние и летние, в соответствии с рисунками 5, 6. В

летнее время ТЭЦ несет нагрузку только горячего водоснабжения (ГВС). Расчеты проведены для фактических показателей эксплуатации ТЭЦ в 2011, 2013 и 2014 годах.

Для наглядности рисунок 5 включает не только фактический и оптимальный расходы топлива, но и тот, который дает оценка по нормативному расчету (форма 3-тех) при фактической загрузке оборудования. По рисункам 5 и 6 легко видеть, что для рассмотренных ТЭЦ совокупная экономия топлива при оптимизации режимов в зимний период составляет 0,22-2,4 кг/с, а в летний 0,02-1,48 кг/с, что в сумме составляет 1-3% от среднегодового расхода топлива, причем наибольшая экономия топлива достигается в зимние месяцы, примерно в 1,6 раза больше чем в летние. Этот факт обусловлен большей загрузкой (~75-85% от номинального) оборудования.

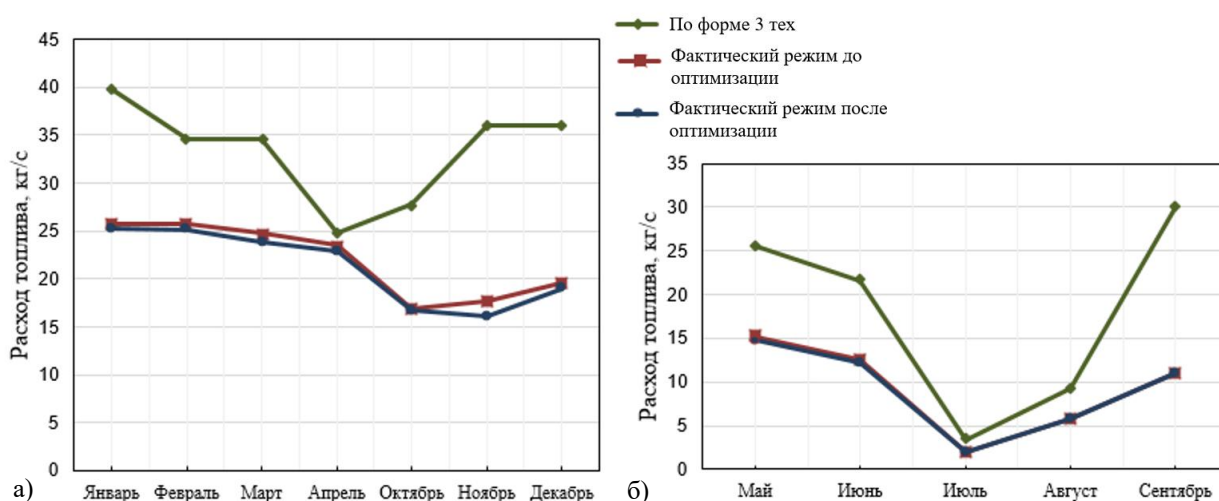


Рисунок 5 - Результаты оптимизационных расчетов для Новосибирской ТЭЦ-2 в 2014г.: а) зимние режимы работы; б) летние режимы работы

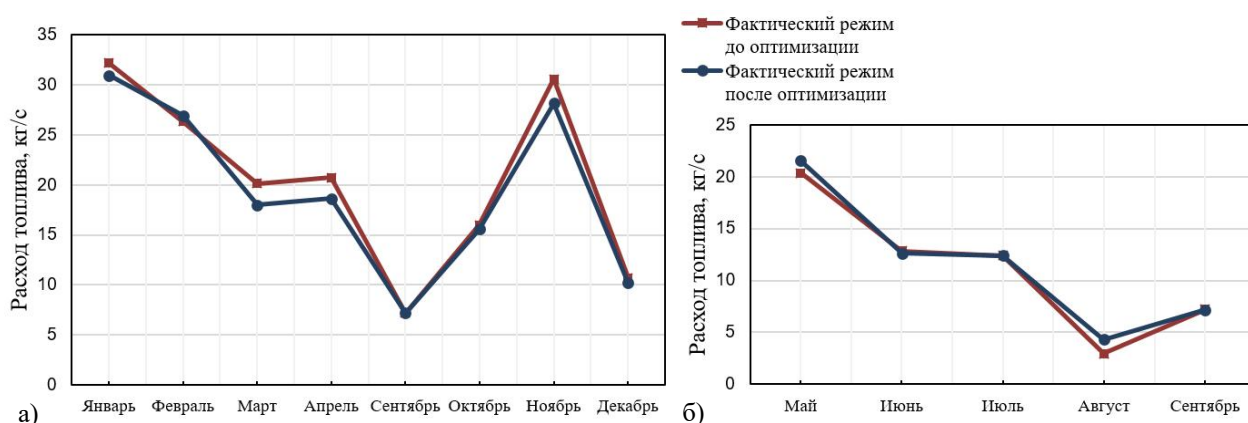


Рисунок 6 - Результаты оптимизационных расчетов для Бийской ТЭЦ в 2011г.: а) зимние режимы работы; б) летние режимы работы

В пятой главе проведены технико-экономические оценки работы указанных ТЭЦ. При этом экономия топлива по ТЭЦ в целом за год составит, кг:

$$\Delta B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}} = \sum_n \sum_i \Delta B_i \tau_i, \quad (15)$$

где i – фактический режим; τ_i – время (продолжительность) режима, n – число блоков на ТЭЦ.

Экономический эффект определяется с учетом стоимости топлива, руб.:

$$\mathcal{E} = C_{\text{т}} \Delta B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}}, \quad (16)$$

здесь $C_{\text{т}}$ – цена топлива, руб/кг.

Фактически для исследуемых ТЭЦ показатель \mathcal{E} является некоторой упущенной выгодой в рассматриваемых годах.

Экономия топлива, в соответствии с рисунками 7, 8 для Новосибирской ТЭЦ-2 составит в рассматриваемых годах ~15 тыс. т у.т. (~17,7 тыс. т н.т.) в 2013г. и ~9,4 тыс. т у.т. (~11,2 тыс. т н.т.) в 2014 году, что соответствует упущенной выгоде в размере 12-50 млн. руб. в зависимости от цены на топливо.

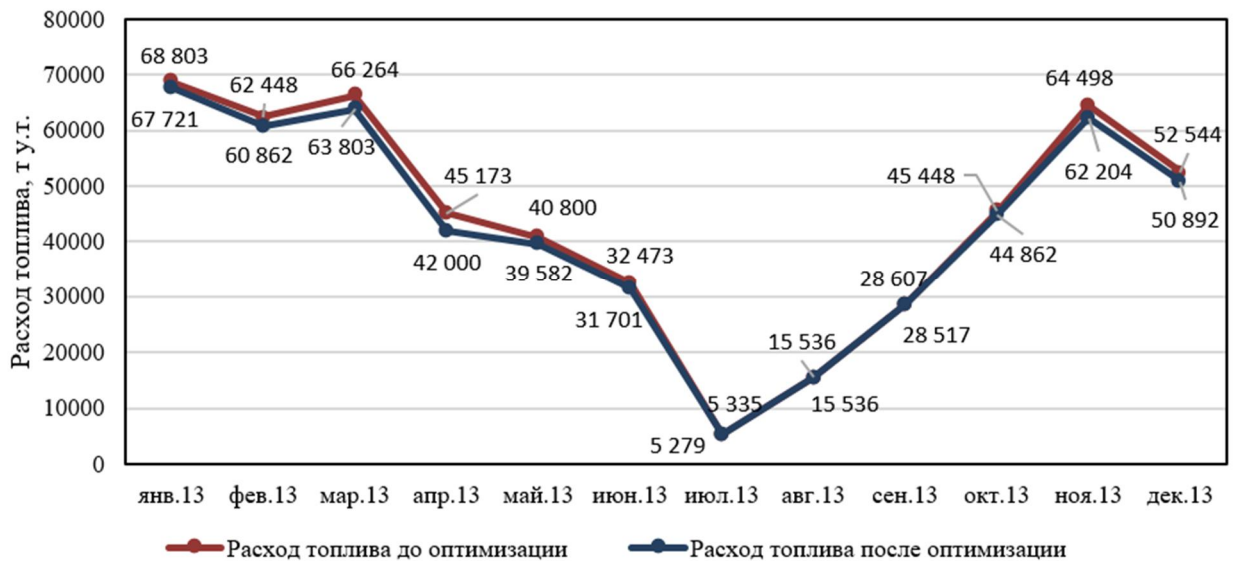


Рисунок 7 - Расход топлива ежемесячно на НТЭЦ-2 в 2013г.

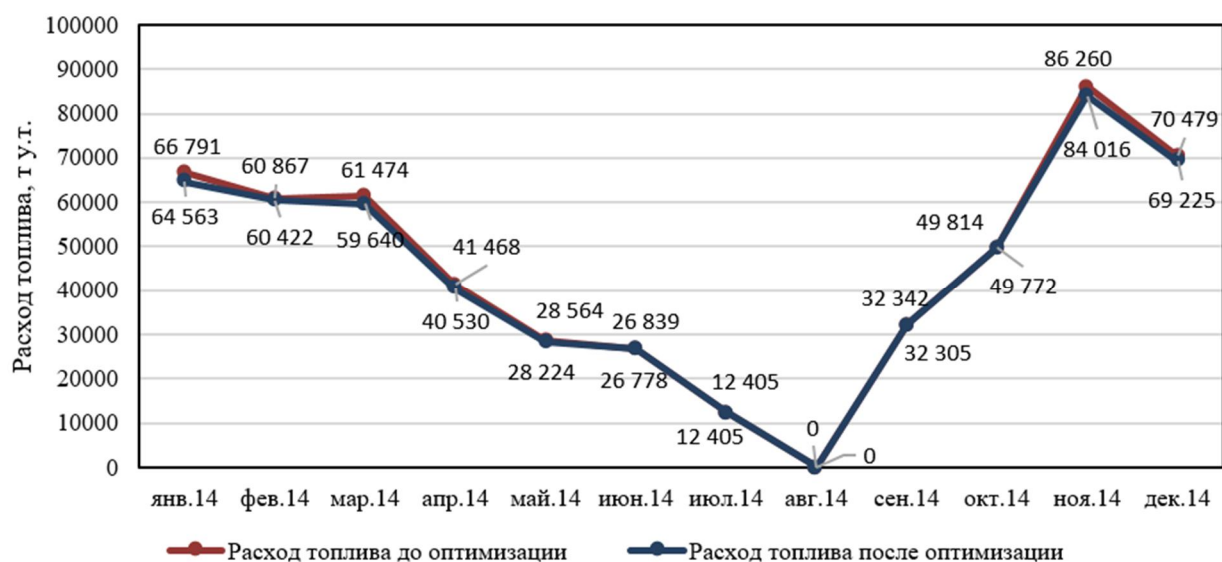


Рисунок 8 - Расход топлива ежемесячно на НТЭС-2 в 2014г.

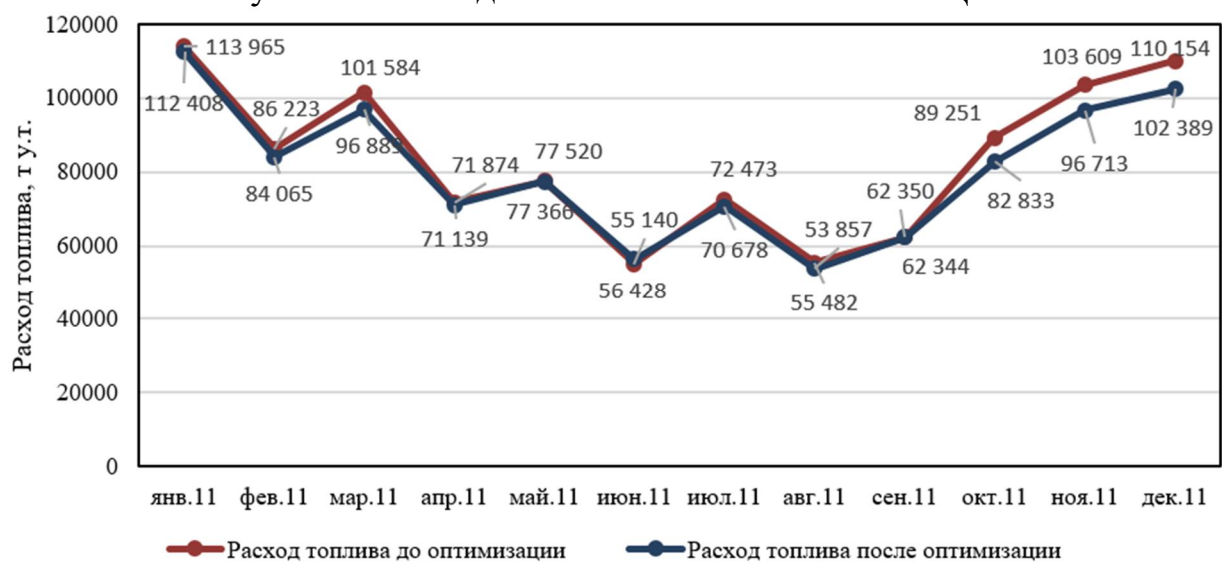


Рисунок 9 - Расход топлива ежемесячно на БТЭС в 2011г.

Для Бийской ТЭС в 2011 году экономия топлива составила ~32,5 тыс. т у.т. (~44,2 тыс. т н.т.), в соответствии с рисунком 9, а эффект упущенной выгоды выражается суммой в 44-140 млн. руб. в зависимости от стоимости топлива, которая в расчетах принята на уровне 1000-3000 руб./т н.т.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано применение эксергетической функции цели при оптимальном распределении нагрузок между энергоблоками ТЭС. При этом впервые разработан дифференциально-эксергетический метод распределения нагрузки между энергоблоками ТЭС, когда энергоблоки представлены в виде сложных систем элементов со связями, при этом по связям двигаются потоки эксергии, что в общем случае позволяет решить задачу распределения ресурсов на отпускаемую продукцию разного вида. Дифференциальность метода позволяет определить характеристики энергоблоков в любом

расчетном сечении (в частности, при отпуске электроэнергии с клемм генератора, а теплоэнергии – в любом отборе или за турбиной), а функцией цели выступает максимальная эффективность для совокупности работающих на ТЭЦ энергоблоков.

2. Впервые разработан принципиальный алгоритм эксергетической оптимизации режимов работы ТЭЦ. При этом расчетный комплекс включает процедуру расчета тепловой схемы энергоблока, включенную в процедуры оптимизации, что позволяет повысить точность распределения нагрузок по сравнению с применением характеристик относительных приростов.

3. Показано, что повышение эффективности при оптимизации нагрузок агрегатов ТЭЦ может составлять 1,5-3% по сравнению с пропорциональной нагрузкой оборудования. При этом меньшие значения соответствуют меньшим тепловым и электрическим нагрузкам ТЭЦ. Экономия топлива на энергоблоке при этом может составлять 0,02-0,07 кг/с. Наибольший эффект от оптимизации нагрузок агрегатов ТЭЦ может быть обеспечен при нагрузках ТЭЦ в диапазоне 0,6-0,8 от максимальных значений.

4. Оценка устойчивости оптимальных решений показывает, что при снижении начальных параметров на некоторых энергоблоках на ~2%, сопровождающихся снижением эффективности на блоке на ~0,3-0,4% абсолютных, оптимизация режимов позволяет обеспечить суммарный КПД ТЭЦ на 1,5-5% выше, чем на тех же энергоблоках, работающих на номинальных параметрах, но без оптимизации при пропорциональном разделении нагрузок.

5. Для действующих ТЭЦ мощностью 340-535 МВт показано, что экономия топлива от оптимизации режимов в зимний период может составлять 0,22-2,4 кг/с, а в летний 0,02-1,48 кг/с, что в сумме составляет 1-3% от среднегодового расхода топлива. Показано, что наибольшая экономия топлива достигается в зимние месяцы, примерно в 1,6 раза больше чем в летние.

6. Показано, что эффект экономии топлива составит 9423 – 32513 т у.т./год в зависимости от станции и года эксплуатации, что в финансовом выражении составит 12-140 млн. руб. в диапазоне цен на топливо 1000-3000 руб./т у.т.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Оптимизация режимов работы энергоблоков ТЭЦ / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко, О. В. Боруш, С. В. Зыков // Известия Российской академии наук. Энергетика. - 2014. № 3. С. 54-60.

2. Показатели режимов работы ТЭЦ при эксергетическом анализе / О. В. Боруш, Г. В. Ноздренко, С. В. Зыков, Ч. Оршуу, П. А. Щинников // Научный

вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2014. - №4(57). - С.175-184.

3. Эксергетический анализ показателей режимов работы ТЭЦ = Exergic analysis of CHP operating mode efficiency / Г. В. Ноздренко, О. В. Боруш, П. А. Щинников, С. В. Зыков, Ч. Оршуу // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. - № 1 (26). - С. 66-74.

4. Критерий эффективности при эксергетической оптимизации функционирования энергопреобразования / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко, Ф.А. Серант, В. Г. Томилов, А. В. Сафронов, С. В. Зыков // Доклады ТУСУРа. - 2012. - № 1 (25), ч. 1. - С. 204-208.

5. Оценка реального расхода топлива энергоблоками ТЭЦ на основе оптимизационных расчетов их режимов работы / О.В. Боруш, С.В. Зыков, А.В. Сафронов, В.Г. Томилов, П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко // Доклады академии наук ВШ РФ. – 2013.№2(21),июль-дек. С. 26-33.

Сборники научных трудов и материалы конференций.

6. Зыков С.В. Программный комплекс для распределения тепловой и электрической нагрузок на ТЭЦ / С.В. Зыков // Наука Технологии Инновации : Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. доц. О.В. Боруш. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 4. – 225-226 с.

7. Зыков С.В. Методика расчета оптимальных нагрузок ТЭЦ / С.В. Зыков // Наука Технологии Инновации : Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. доц. О.В. Боруш. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 4. – 227-228 с.

8. Зыков С. В. Оптимизация распределения нагрузки между энергоблоками ТЭЦ / С. В. Зыков, П. А. Щинников // Проблемы теплоэнергетики : сб. науч. тр. по материалам 12 междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 2014 г. - Саратов : Изд-во СГТУ, 2014. - Вып.3. - С.63-67. - 100 экз. - ISBN 978-5-7433-2768-3.

9. Зыков С. В. Описание математической модели распределения тепловых и электрических нагрузок на ТЭЦ / С. В. Зыков, А. А. Ловцов, П. А. Щинников // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы 4 Рос. молодеж. науч. шк.-конф., Томск, 1-3 нояб. 2016 г. : в 2 т. – Томск: ЦРУ, 2016. - Т. 2. - С. 38 - 41. - 100 экз.

10. Зыков С. В. Программный комплекс для оптимизации режимов работы ТЭЦ / С. В. Зыков, П. А. Щинников // Энергетика и теплотехника : сб. науч. трудов. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. - Вып. 20. - С.176-182. - 150 экз. - ISBN 978-5-7782-2976-1.

11. Зыков С. В. Разработка программного комплекса для оптимизации режимов работы ТЭЦ / С. В. Зыков, П. А. Щинников // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы 4 Рос. молодеж. науч. шк.-конф., Томск, 1-3 нояб. 2016 г. : в 2 т. – Томск: ЦРУ, 2016. - Т. 2. - С. 366 - 370. - 100 экз.

12. Щинников П. А. Эксергетическая оптимизация режимов ТЭЦ / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко, С. В. Зыков // Энергетика и теплотехника : сб. науч. тр. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. - Вып.18. - С.110-117.

13. Дулааны Цахилгаан Станцын Ажиллагааны Горимын ҮзҮҮлэлтийг Эксергийн Шинжилгээгээр Тодорхойлох / О. В. Боруш, С. В. Зыков, Г. В. Ноздренко, Ч. Оршуу, П. А. Щинников // Хурэл тогоот-2014, техник, технологийн салбарын эрдэм шинжилгээний бага хурал. – УЛААНБААТАР, 2014. – Х. 251–255. – ISBN 978-99973-46-99-5

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

14. С.В. Зыков, П.А. Щинников Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660362 «CHPP optimizer – GUI» - Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2015г.

15. С.В. Зыков, П.А. Щинников Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660536 «CHPP optimizer – Events» - Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2015г.

16. С.В. Зыков, П.А. Щинников Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660620 «CHPP optimizer – DB» - Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05 октября 2015г.

17. С.В. Зыков, П.А. Щинников, В.Г. Томилов Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617306 «CHPP optimizer – RDS»- Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2015г.

18. С.В. Зыков, П.А. Щинников, О.К. Григорьева Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660619 «CHPP Optimizer» - Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05 октября 2015г.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 × 86/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.
заказ №863 подписано в печать 20.06.2017