

На правах рукописи



ФРАНЦЕВА
Алина Алексеевна

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЭЦ
С ГАЗОСЕТЕВЫМ ПОДОГРЕВАТЕЛЕМ
И ФРЕОНОВЫМИ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРАМИ**

Специальность 05.14.14 – тепловые электрические станции,
их системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ноздренко Геннадий Васильевич
доктор технических наук, профессор,
Щинников Павел Александрович

Официальные оппоненты: **Огуречников Лев Александрович**
доктор технических наук, с.н.с.
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
СО РАН, отдел теплофизики многофазных
систем, лаборатория процессов переноса,
главный научный сотрудник

Вдовенко Иван Анатольевич
кандидат технических наук,
Саратовский государственный технический
университета им. Ю. А. Гагарина, доцент ка-
федры «Теплоэнергетика»

Ведущая организация: институт систем энергетики
им. Л. А. Мелентьева СО РАН

Защита диссертации состоится «9» октября 2015 года в 10⁰⁰ 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 университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «11» августа 2015 г.

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



Чичиндаев Александр Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Особенности теплоснабжения в России (в отличие от большинства стран мира) – широкое распространение систем централизованного теплоснабжения в крупных городах. Одновременная выработка электрической и тепловой энергии имеет бесспорные преимущества с точки зрения использования топлива. Многолетнее развитие этого направления позволило достичь высокой эффективности, приобрести большой опыт в эксплуатации систем централизованного теплоснабжения. Эти системы технологически и экологически развиваются и совершенствуются.

Одним из перспективных направлений при совершенствовании систем централизованного теплоснабжения является разработка и исследование комбинированных систем теплоснабжения на основе применения тепловых насосов. Такие комбинированные системы, реализованные в Дании, Германии и США, показали высокую технико-экономическую эффективность. Развитие комбинированных систем теплоснабжения в современных экономических условиях может рассматриваться как процесс поэтапной их реализации в районах городских новостроек, в промышленных районах, где вводятся мини-ТЭЦ для собственного энергоснабжения предприятий и энергообеспечения их инфраструктуры, в рамках реконструкции ТЭЦ и систем теплоснабжения. Развитию этого направления посвящены работы Андриющенко А. И., Накорякова В. Е., Соколова Е. Я., Хрилёва Л. С., Бродянского В. М., Огуречникова Л. А., Николаева Ю. Е. и др., Bailer Peter, Bernd Thomas, David Mertens, Yingke Tan, Morosyuk T. V.

С другой стороны, опыт развития мировой энергетики показывает, что повышение тепловой экономичности энергоблоков ТЭЦ возможно путем применения парогазовых технологий.

Соединение в одном теплофикационном энергоблоке газотурбинных и паротурбинных установок, работающих по высоко- и низкотемпературным циклам, позволяет повысить эффективность использования топлива и обеспечить рост КПД при работе ПГУ ТЭЦ в конденсационном режиме до 50...55%, т.е. до уровня, недостижимого для других тепловых двигателей.

Парогазовый энергоблок ТЭЦ улучшает и экологические характеристики, т.к. снижение удельных выбросов оксидов азота и серы по сравнению с традиционной ТЭЦ может достигать 50%.

В связи с этим актуально предложить новую схему, которая включала бы в себя парогазовые технологии и комбинированную систему теплоснабжения с использованием тепловых насосов (фреоновых термотрансформаторов).

Объект исследования: теплофикационные энергоблоки ТЭЦ с газо-сетевым подогревателем (ГСП) в составе комбинированной системы теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами (ФТТ).

Предмет исследования: оптимизационные исследования теплофикационных энергоблоков ТЭЦ с газосетевым подогревателем в составе комбинированной системы теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами и теоретическое обоснование оптимальных решений.

Целью работы являются исследование эффективности и оптимизация параметров теплофикационных энергоблоков ТЭЦ с газосетевым подогревателем в составе комбинированной системы теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами.

Задачи исследования:

1. разработать методику эксергетического и технико-экономического анализа функционирования ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ;
2. разработать математическую модель функционирования ТЭЦ с газосетевыми подогревателями и фреоновыми термотрансформаторами;
3. выполнить схемно-параметрическую оптимизацию ТЭЦ с ГСП и ФТТ, исследовать влияние системных факторов на технико-экономическую эффективность;
4. разработать рекомендации по выбору оптимальных конструктивно-компоновочных параметров ФТТ и схемно-параметрических решений для ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. методика эксергетического и технико-экономического анализа функционирования ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ;
2. математическая модель функционирования ТЭЦ с газосетевыми подогревателями и фреоновыми термотрансформаторами;
3. новая схема ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ;
4. схемно-параметрическая оптимизация ТЭЦ с ГСП и ФТТ, исследование влияния системных факторов на технико-экономическую эффективность;
5. разработанные рекомендации по выбору оптимальных конструктивно-компоновочных параметров ФТТ и схемно-параметрических решений для ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ.

Методы исследования: математическое и компьютерное моделирование ТЭЦ, методы эксергетического анализа и технико-экономической оптимизации в условиях неопределённости исходной информации.

Практическая значимость работы. Разработанная методика, методический подход, математическая модель, алгоритмы и программа расчета позволяют получать оптимальные схемно-параметрические решения для ТЭЦ-ГСП-ФТТ. Рассчитанные технико-экономические показатели могут служить информационной базой для обоснования рациональных областей использования ТЭЦ с ГСП и ФТТ как при реконструкции традиционных ТЭЦ, так и при разработке и создании ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ.

Личный вклад автора. Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Анализ и обсуждение полученных результатов проведен автором совместно с научным руководителем.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием методики технико-экономических и эксергетических системных исследований, фундаментальных закономерностей технической термодинамики, теплопередачи. Математические модели и компьютерное моделирование ТЭЦ с ГСП и ФТТ базируются на методах, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших на решении ряда других задач подобного класса. При отработке моделей проведены сравнительные тестово-расчётные компьютерные эксперименты, выполнено сравнение рассчитанных параметров теплофикационных энергоблоков с реальными параметрами.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011, 2013), на международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2011, 2012, 2013), на всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2011, 2012, 2013, 2014), на международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2013), на международной научно-технической конференции «Энергия-2013» (г. Иваново, 2013), на международной научно-практической конференции «перспективное развитие науки, техники и технологий» (г. Курск, 2013), на международной научно-практической конференции «Проблемы теплоэнергетики» (г. Саратов, 2012, 2014).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 21 печатных изданиях: из них 7 – научных статей (3 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК), 14 – в сборниках трудов конференций, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (145 наименований). Основной текст изложен на 94 страницах, содержит 41 рисунок, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформирована цель исследования, определена научная новизна работы и практическая значимость.

В **первой главе** рассмотрены перспективные схемы комбинированных систем теплоснабжения, проанализирована техническая готовность парогазовых установок и фреоновых термотрансформаторов и обосновывается актуальность развития комбинированных систем теплоснабжения, как один из способов совершенствования теплоснабжающих систем.

Во **второй главе** предложена новая (запатентованная [10]) схема комбинированного теплоснабжения от ТЭЦ с газосетевым подогревателем и фреоновыми термотрансформаторами, изложены основы методических подходов к исследованию и методика эксергетического анализа предложенной схемы.

Разработанная методика оценки и анализа технико-экономической эффективности ТЭЦ с ГСП и комбинированной системой теплоснабжения с внутриквартальными фреоновыми термотрансформаторами базируется на эксергетической методологии и является развитием работ в направлении методического и технико-экономического учёта функционирования ГСП и внутриквартальных ФТТ в составе ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения.

Методические особенности такого подхода – следующие. Во-первых, это – условное разбиение схемы теплофикационного энергоблока ТЭЦ с ГСП и комбинированной системой теплоснабжения с ФТТ (рисунок 1) на несколько функционирующих подсистем, и представление в виде эксергетической структурной схемы. Во-вторых – математическое описание (моделирование) функционирования и использование этой модели при расчетах в вычислительном комплексе, имитирующем работу энергоблока. В-третьих – оптимизация параметров функционирования по условиям действия ограничивающих факторов. В-четвертых – определение и анализ эксергетических и технико-экономических показателей сравниваемых вариантов.

Каждая функционирующая подсистема энергоблока рассматривается как преобразователь эксергии, имеющий математическое описание:

$$i = i(E_i^x, E_i^y, \eta_i, Z_i), \quad (1)$$

где $E_i^x = \sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x$ - подводимая эксергия;

E_{ki}^x – эксергия, подводимая к функционирующей подсистеме с k -м энергоносителем по k -му каналу связи (представленному в графе k -й дугой);

$V(i)$ – множество входов;

$$E_i^y = \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y - \text{эксергетическая производительность функционирующей}$$

подсистемы;

E_{ij}^y – эксергия, отводимая с j -м энергоносителем по j -му каналу связи (представленному в графе j -й дугой);

$W(i)$ – множество выходов.

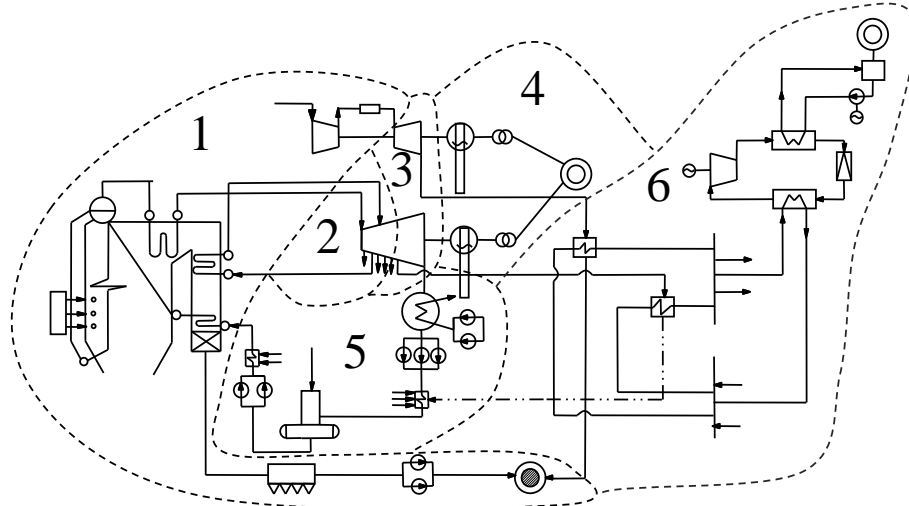


Рисунок 1. – Вариант разбиения комбинированной системы теплоснабжения на функциональные подсистемы

Эксергетическая эффективность функционирующей подсистемы:

$$\eta_i = \frac{E_i^y}{E_i^x}, i \in I_2, \quad (2)$$

где $I_2 \in I$ - множество функционирующих подсистем энергоблока, множество I включает кроме этого множество источников топлива I_1 и энергопотребителей I_3 .

Функция Z_i характеризует затраты, связанные с созданием и функционированием i -й подсистемы энергоблока.

Для каждой i -ой функционирующей подсистемы входными параметрами являются: E_{ki}^x , $k \in V(i)$, X_i , Z_i ; выходными – потоки эксергии E_{ij}^y , $j \in W(i)$.

Соотношения между потоками эксергии устанавливаются на основе функции Лагранжа:

$$\begin{aligned} L = & 0,123Ц_T \cdot 10^{-3} E_0 + \lambda_0(-E_0 + E_{01}) + \lambda_1(-E_1 + E_{12} + E_{13}) + \\ & + \lambda_2(-E_2 + E_{21} + E_{24} + E_{23} + E_{25}) + \lambda_3(-E_3 + E_{31} + E_{34} + E_{35} + E_{36}) + \\ & + \lambda_4(-E_4 + E_{41} + E_N + E_{45} + E_{46}) + \lambda_5(-E_5 + E_{51}) + \\ & + \lambda_6(-E_6 + E_{65} + E_T) + \sum_{i=0}^6 Z_i, \end{aligned} \quad (3)$$

Из решения системы уравнений $\frac{\partial L}{\partial E_0^y} = 0, \dots, \frac{\partial L}{\partial E_i^y} = 0$ находятся множители

Лагранжа, характеризующие удельные затраты на отпускаемую эксергию.

Эксергетические КПД по отпуску электроэнергии:

$$\eta_4 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \varepsilon_S \varepsilon_N, \quad (4)$$

и теплоэксергии:

$$\eta_6 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_6 \varepsilon_S \varepsilon_N, \quad (5)$$

где ε_S – структурный эксергетический коэффициент, учитывающий взаимосвязи между функционирующими подсистемами энергоблока, а так же системные связи:

$$\varepsilon_S = F_{01}^{-1} \left[1 - \eta_1^{-1} \sum \Pi F_{ij} \eta_i^{-1} \right], \quad (6)$$

ε_N – эксергетический коэффициент внутрициклового возврата потерь теплоты в турбоагрегате:

$$\varepsilon_N = (\eta_2 \eta_3 \sum_{i=2,3} F_{i4} \eta_i^{-1})^{-1}. \quad (7)$$

Технико-экономическая эксергоэффективность комбинированной системы теплоснабжения по отпуску электроэнергии:

$$\Omega_N = \frac{\lambda_0}{\lambda_4} = \eta_N \frac{\lambda_0}{0,123 \text{Ц}_T \cdot 10^{-3} + 3'_0 + Z_N} = \eta_N \frac{1}{1 + Z_N / \lambda_0}, \quad (8)$$

где

$$Z_N = \left[F_{01}^{-1} \left(\sum_{i=0}^5 3'_i F_{i1} + \sum 3'_i \eta_i \Pi F_{ij} \eta_i^{-1} \right) \right] + \eta_1 \eta_2 \eta_3 \varepsilon_S \varepsilon_N \sum_{i=2}^4 3'_i F_{i4} - 3'_0,$$

по отпуску теплоэксергии:

$$\Omega_Q = \frac{\lambda_0}{\lambda_6} = \eta_T \frac{\lambda_0}{0,123 \text{Ц}_T \cdot 10^{-3} + 3'_0 + Z_Q} = \eta_T \frac{1}{1 + Z_Q / \lambda_0}, \quad (9)$$

где

$$Z_Q = \left[F_{01}^{-1} \left(\sum_{i=0}^5 3'_i F_{i1} + \sum 3'_i \eta_i \Pi F_{ij} \eta_i^{-1} \right) \right] (F_{46} + \eta_2 \eta_4 \varepsilon_N F_{36}) + \\ + \eta_T [(\eta_4 \eta_6)^{-1} F_{46} \sum_{i=2}^4 3'_i F_{i4} + \eta_6^{-1} 3'_6 (F_{36} + \eta_6)] - 3'_0;$$

$$0 < \Omega_N < 1, 0 < \Omega_Q < 1.$$

Наряду с (9), (10) используется критерий технико-экономической эффективности:

$$\eta_Z = \frac{\sum \Pi_N N + \sum \Pi_E E_T}{\sum_{\tau} \lambda_4 N + \sum_{\lambda} \lambda_6 E_T}, \quad (10)$$

где $\Pi_N; \Pi_E$ – получаемая плата за электроэнергию и теплоэнергию в данном τ -м году, руб./($\text{kВт}\cdot\text{ч}$);

$N; E_T$ – отпущенные в τ -м году потребителю электроэнергия и теплоэнергия, $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{г}$;

λ_4, λ_6 – удельные затраты на отпускаемую электроэнергию и теплоэнергию.

Очевидно, что критерий эффективности должен быть больше единицы:

$$\eta_Z > 1, \quad (11)$$

и чем он выше, тем эффективнее рассматриваемый вариант.

Математическая постановка задачи схемно-параметрической оптимизации энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ представлена как:

$$\left\{ \min_{x \in R^n} \left[\tilde{\eta}_Z(x) \right]^{-1} \left[\bar{\Phi}_u(\omega) = 0, u \in U \right] \right\}, \quad (12)$$

где $\bar{\Phi}_u(\omega)$ – вероятностный логико-числовой оператор функциональных отношений;

U – множество логико-числовых операторов;

$\omega = (x, y, \Gamma, G, R^n, L)$ – информационная структура,

где Γ – множество энергоблоков;

L – множество логических управляющих параметров;

G – множество внешних связей и исходных данных с известными законами распределения случайных компонент.

Минимум целевой функции находится методом случайного направленного поиска с учетом ограничений и условий:

- допустимая область пространства R^n замкнута;
- функции $\tilde{\eta}_Z(x)$, $H(x, y)$, $F(x, y)$ являются непрерывными и дифференцируемыми в допустимой области;
- допустимая область пространства R^n не пуста.

Третья глава посвящена оптимизационным исследованиям и оценке эффективности ТЭЦ с ГСП и комбинированной системой теплоснабжения с ФТТ, а также эксергетическим показателям функционирования.

ТЭЦ с ГСП и ФТТ может быть спроектирована и разработана на базе как оптимального энергооборудования, так и на базе традиционных теплофикационных паротурбинных энергоблоков ТЭЦ путем их газотурбинной надстройки с газосетевым подогревателем, перевода в режим с постоянным давлением в теплофикационном отборе и количественным регулированием отпуска тепла сетевой установкой при качественном регулировании теплоснабжения внутриквартальными термотрансформаторами.

Исследование проведено для энергоблоков ТЭЦ стандартных типоразмеров в диапазоне мощностей от 50 до 250 МВт (турбины Т-50, Т-110, Т-175, Т-180, Т-250).

На рисунке 2 приведены оптимальные параметры острого пара и питательной воды для энергоблоков ТЭЦ с турбинами Т-50...Т-250 с ГСП и ФТТ.

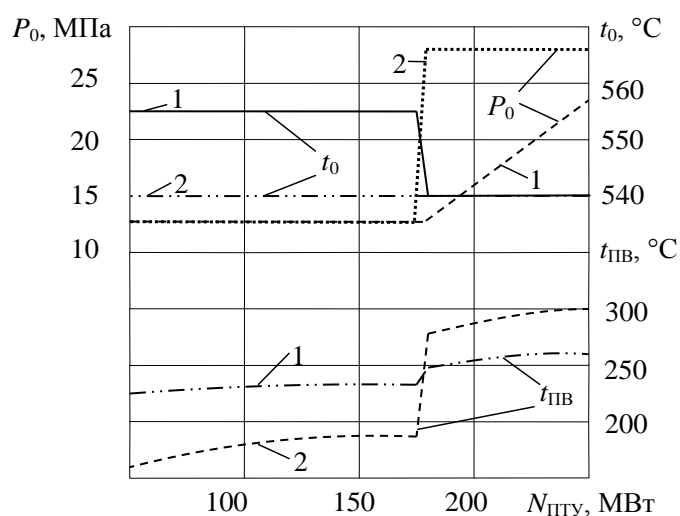


Рисунок 2 – Параметры острого пара (P_0 , t_0) и температура питательной воды ($t_{ПВ}$) энергоблоков ТЭЦ-ГСП-МТ-ФТТ: 1-стандартные параметры; 2-оптимальные параметры

Оптимальное давление острого пара сопоставимо с давлением, принятым для стандартных энергоблоков соответствующих типоразмеров, т.е. находится на уровне 13 МПа и увеличивается до 28 МПа с ростом мощности энергоблока. Из рисунка 2 так же видно, что при разработке специальных (оптимальных) энергоблоков температура острого пара (начальная температура) для энергоблоков без промперегрева, так и при введении промперегрева должна приниматься на уровне 540°С, температура питательной воды для блоков без промперегрева и докритических параметров принимается на уровне 160-200 °С, что ниже стандартных значений на 40-70 °С, а с введением промперегрева и переходом на закритические параметры принимается на уровне 280-300 °С, что выше традиционной температуры питательной воды на 40-60 °С. Для обеспечения такой температуры питательной воды требуется установка четырех ПВД (подогреватель высокого давления) вместо трех, а паровая турбина должна иметь еще один отбор высокого давления.

Мощность ГТУ (рисунок 3) для оптимальных энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ на 11...50% больше, чем для энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ со стандартными параметрами.

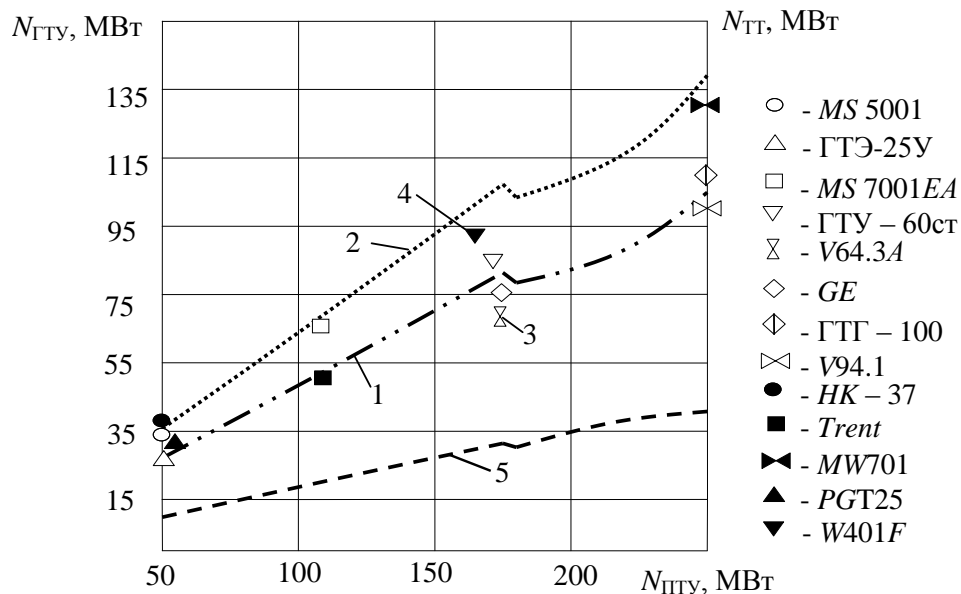


Рисунок 3 – Потребляемая термотрансформаторами электроэнергия $N_{ТТ}$ и мощность ГТУ $N_{ГТУ}$, соответствующая мощности $N_{ПГУ}$ теплофикационной паротурбинной установки ПГУ: 1,2 – Расчетная мощность $N_{ГТУ}$ при стандартных и оптимальных параметрах ПГУ; 3,4 – коммерческие ГТУ в составе ПГУ стандартных и оптимальных параметрах; 5 – потребляемая термотрансформаторами электроэнергия

Анализируя значения расчетной мощности газотурбинной установки и мощности коммерческих ГТУ видно, что в составе энергоблока ТЭЦ с ГСП стандартных и оптимальных параметров традиционные теплофикационные паротурбинные установки в целом ряде проектов могут быть укомплектованы коммерческими ГТУ. При этом потребление электроэнергии внутриквартальными фреоновыми термотрансформаторами в составе ПГУ с Т-50...Т-250 будет на уровне 10–40 МВт.

На рисунке 4 представлены значения стандартного и оптимального давлений конденсации фреона. При разработке специальных (оптимальных) энергоблоков давление в конденсаторе ФТТ принимается меньше стандартного на 0,2-0,5 МПа, что приведет к некоторому увеличению суммарной площади поверхностей теплообмена конденсаторов фреоновых термотрансформаторов (рисунок 5).

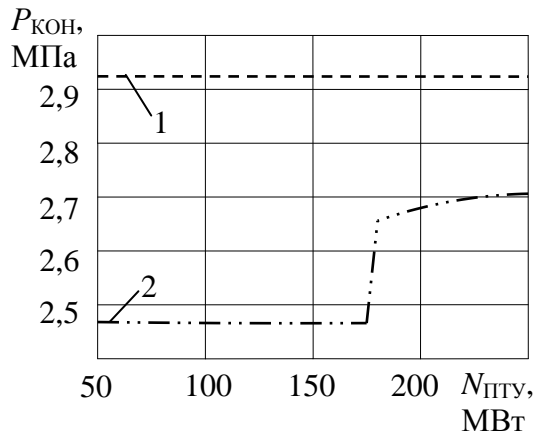


Рисунок 4 – Давление конденсации фреона в конденсаторе фреонового термотрансформатора $P_{\text{кон}}$, МПа: 1 – стандартное; 2 – оптимальное

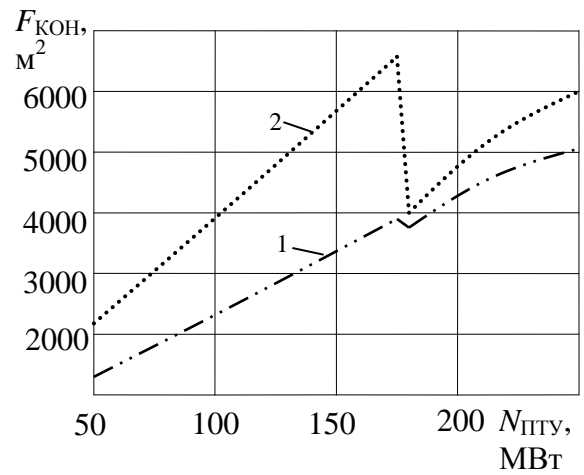


Рисунок 5 – Суммарная поверхность теплообмена конденсаторов ФТТ $F_{\text{кон}}$, m^2 : 1 – при стандартных параметрах; 2 – при оптимальных параметрах

На рисунке 6 представлены значения стандартного и оптимального давления испарения фреона. При разработке специальных (оптимальных) энергоблоков давление в испарителе ФТТ принимается больше стандартного на 0,2 МПа, что приведет к увеличению суммарной площади поверхностей теплообмена испарителей фреоновых термотрансформаторов (рисунок 7).

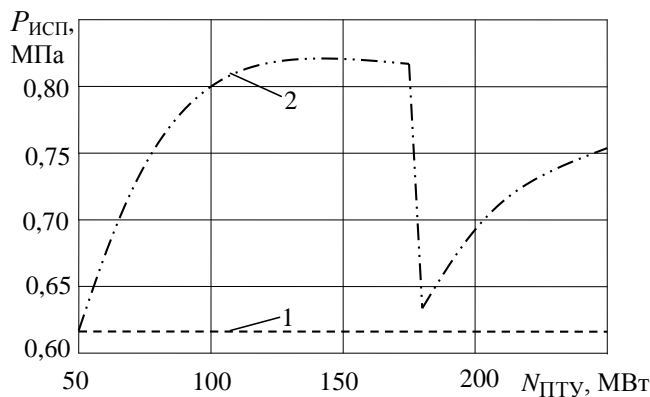


Рисунок 6 – Давление фреона в испарителе фреонового термотрансформатора $P_{\text{исп}}$, МПа: 1 – стандартное; 2 – оптимальное

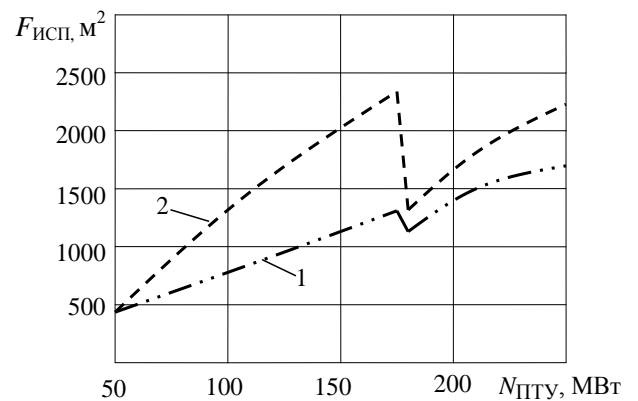


Рисунок 7 – Суммарная поверхность теплообмена испарителей ФТТ $F_{\text{исп}}$, m^2 : 1 – при стандартных параметрах; 2 – при оптимальных параметрах

На рисунке 8 представлены оптимальные эксергетические КПД подсистем энергоблока с ГСП и комбинированной системой теплоснабжения с ФТТ. На рисунке видно, что для ПГУ с паротурбинными установками без промперегрева КПД первой подсистемы (парогазогенерирующей) η_1 находится на уровне 0,7-0,72. Ввод промперегрева и переход на закритические параметры повышает это значение до 0,78-0,79, что в 1,2...1,35 раза больше, чем для традиционных тепло-

фикационных паротурбинных установок. Это обусловлено тем, что по сравнению с традиционными установками η_1 учитывает не только генерирование острого пара и пара промперегрева, но и генерирование в технологической схеме: компрессор-камера сгорания ГТУ. КПД подсистем ЧВД, ЧСНД совместно с газовой турбиной ($\eta_2; \eta_3$) практически находятся на том же уровне значений, что и для традиционной ПТУ.

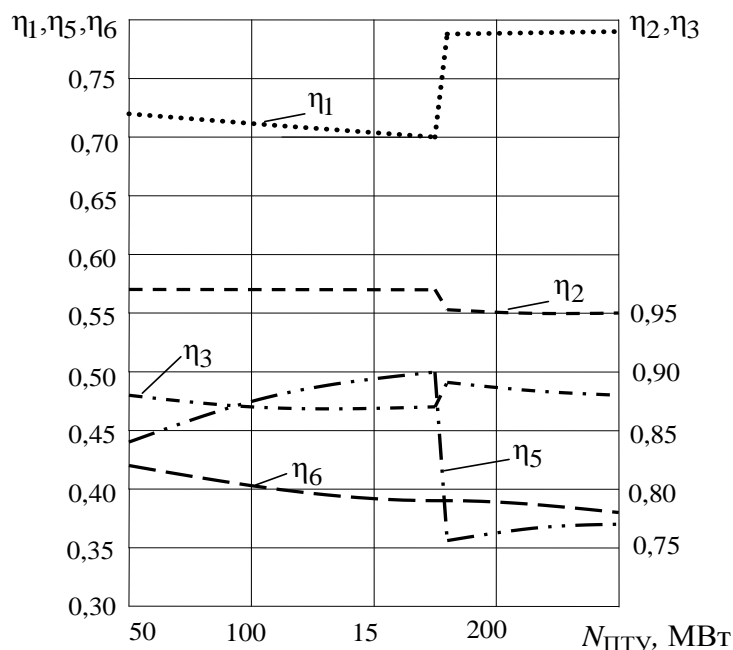


Рисунок 8 – Оптимальные эксергетические показатели ПГУ: $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_5, \eta_6$ – эксергетические КПД подсистем: парогазогенерирующей; ЧВД паровой турбины; ЧСНД паровой турбины совместно с газовой турбиной; регенерации и технического водоснабжения; сетевой установки с ГСП и фреоновыми термотрансформаторами; $N_{ПТУ}$ – мощность паротурбинной установки ПГУ

Эксергетическая эффективность сетевой установки с ГСП и фреоновыми термотрансформаторами (η_6) по сравнению с традиционной установкой, примерно в два раза выше, что обусловлено меньшими эксергетическими потерями в системе ГСП – фреоновый термотрансформатор и переход на низкотемпературный график.

На рисунке 9 приведены значения эксергетических КПД по отпуску электроэнергии и теплоэксергии при стандартных и оптимальных параметрах ТЭЦ с ГСП и ФТТ. Из этих данных видно, что для энергоблоков с Т-50...Т-175 (без промперегрева и докритических параметров пара) КПД по отпуску электроэнергии находятся на уровне 0,435-0,475. КПД энергоблоков с теплофикационными турбинами с промперегревом Т-180 и Т-250 составляет 0,45-0,5. КПД по отпуску теплоэксергии 0,16-0,185.

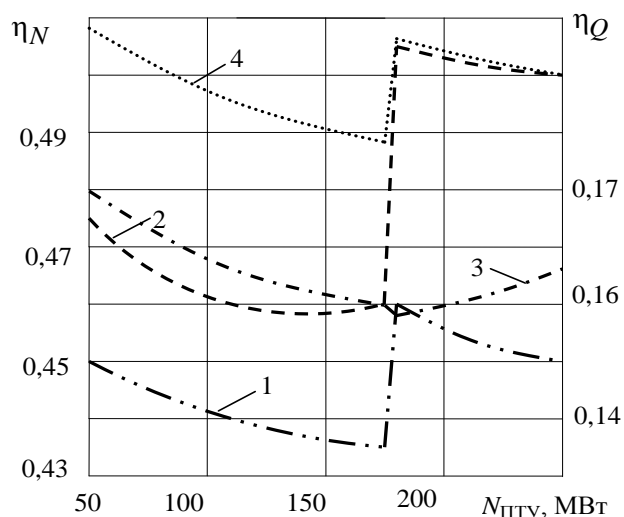


Рисунок 9 – КПД по отпуску электроэнергии η_N и теплоэнергии η_Q от ТЭЦ с ГСП и термотрансформаторами: 1, 2 – η_N ; 3,4 – η_Q при стандартных и оптимальных параметрах

В четвертой главе определена технико-экономическая эффективность ТЭЦ с ГСП и ФТТ.

Эксергетическая оценка эффективности энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ характеризуется двумя технико-экономическими КПД (рисунок 10): по отпуску электроэнергии и отпуску теплоэнергии.

Из рисунка видно, что для энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ стандартных параметров и паротурбинными установками без промперегрева с докритическими параметрами пара технико-экономический КПД по отпуску электроэнергии находится на уровне 0,132– 0,145, а энергоблоков с оптимальными параметрами составляет 0,150 – 0,163.

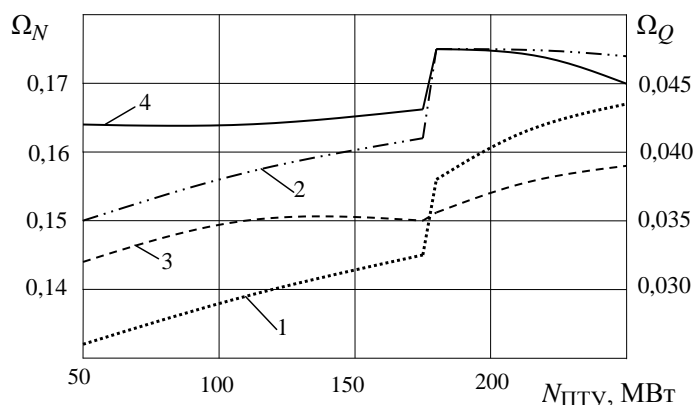


Рисунок 10 – Технико-экономические КПД по отпуску электроэнергии и теплоэнергии Ω_N, Ω_Q от парогазовой ТЭЦ с ГСП и термотрансформаторами: 1,2 – Ω_N ; 3,4 – Ω_Q при стандартных и оптимальных параметрах; $N_{ПТУ}$ – мощность паротурбинной установки ПГУ

Введение промперегрева позволяет повысить КПД Ω_N энергоблоков со стандартными параметрами и с теплофикационными турбинами Т-180 и Т-250 до 0,16–0,167, а энергоблоков с оптимальными параметрами – до 0,175. При этом КПД по отпуску теплоэнергии составляет 0,045–0,047, что почти в два раза больше, чем для традиционных ТЭЦ с ПВК.

Технико-экономическая эффективность функционирования ТЭЦ с ГСП и ФТТ, определяемая по общему интегральному эффекту (как разность между общим интегральным результатом от производственной деятельности объекта и общими интегральными затратами) и рассматриваемая как интегральный социально-экономический эффект, учитывающий влияющие системные факторы, представлена на рисунке 11. Энергоблоки ТЭЦ с ГСП и ФТТ со всеми вариантами теплофикационных турбин можно считать рентабельными, так как критерий эффективности больше единицы. При переходе от традиционной системы теплоснабжения от ТЭЦ с ПВК к комбинированной системе теплоснабжения с ГСП и ФТТ критерий технико-экономической эффективности увеличивается в среднем на 7%. На это оказывает влияние такие факторы как эксергетическая эффективность блока и удельные затраты на отпускаемую электроэнергию и теплоэнергию. Применение энергоблоков с оптимальными параметрами позволяет увеличить критерий технико-экономической эффективности, примерно, в 1,2 раза.

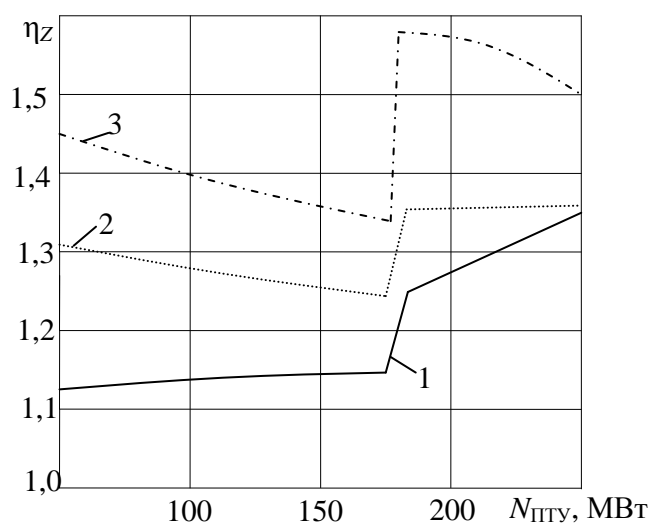


Рисунок 11 – Критерий технико-экономической эффективности: 1 – при стандартных параметрах для традиционной ТЭС с ПВК; 2 – при стандартных параметрах ТЭЦ с ГСП и ФТТ; 3 – при оптимальных параметрах ТЭЦ с ГСП и ФТТ

Выполнена оценка технико-экономической эффективности энергоблоков ТЭЦ с ГСП и ФТТ с учётом включения энергоблоков в энергосистемы (ЭС) различной мощности, изменения числа часов использования установленной мощности, затрат в экологическую инфраструктуру, стоимости топлива, удельной стоимости элементов фреонового термотрансформатора.

В качестве объектов исследования определены энергоблоки на базе турбин Т-50, Т-110, Т-175, Т-180, Т-250.

Технико-экономическая эффективность (рисунок 12) с ростом мощности энергосистемы от 2 до 7 ГВт увеличивается на 4-6 % в зависимости от единичной мощности энергоблока. Это связано с увеличением начальных оптимальных параметров перегретого пара, а значит и увеличением эффективности цикла.

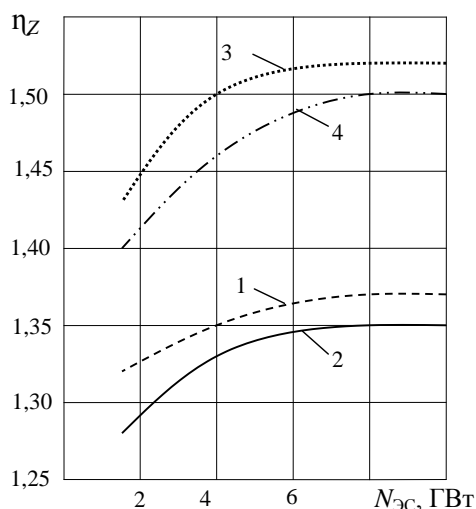


Рисунок 12 – Функция цели η_z : 1 – Т-110, 2 – Т-175, 3 – Т-180, 4 – Т-250

При увеличении числа часов использования установленной мощности τ_N от 3000 до 6500 ч/год технико-экономическая эффективность возрастает в 1,2-1,5 раза, что объясняется увеличением выработки электроэнергии, а значит и увеличением доходной части технико-экономической эффективности (рисунок 13).

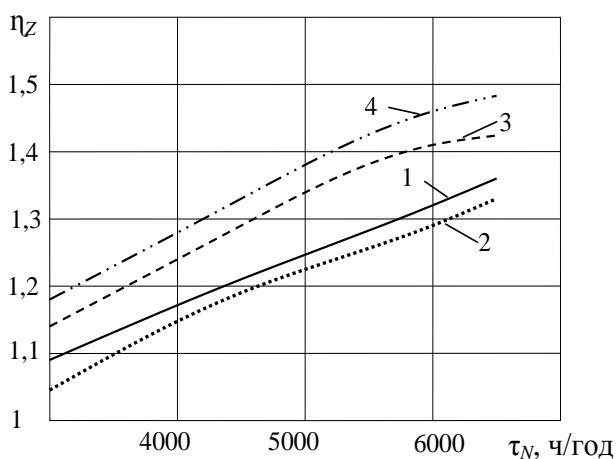


Рисунок 13 – Функция цели η_z : 1 – Т-110; 2 – Т-175; 3 – Т-180; 4 – Т-250

Увеличение затрат в экологическую инфраструктуру, повышение цены топлива и увеличение удельной стоимости элементов фреонового термотрансформатора приводят к уменьшению технико-экономической эффективности, что связано с повышением расходной части технико-экономической эффективности.

Определено изменение оптимальных параметров ТЭЦ с ГСП и ФТТ ($P_0; t_0; t_{пв}$) и параметров испарения и конденсации фреона внутриквартальных фреоновых термотрансформаторов. Давление острого пара устойчиво при изменении всех системных факторов и принимает значения для энергоблоков без промперегрева на уровне стандартных, а для энергоблоков с промперегревом не превышают стандартных суперкритических значений. Температуры острого пара и питательной воды в целом являются устойчивыми. При увеличении мощности ЭС начальная температура пара имеет незначительное повышение, примерно, на 7 %, колебания температуры питательной воды не превышают 10 °С. Увеличение затрат в экологическую инфраструктуру приводит к снижению температуры питательной воды на 20-65 °С. При увеличении цены на топливо температура острого пара для энергоблоков без промперегрева увеличивается на 30-35 °С, при этом температура питательной воды снижается на 10-14 %. Изменение параметров приводит к росту КПД термодинамического цикла и уменьшению расхода топлива, а значит и топливной составляющей затрат.

Проведена оценка коммерческой эффективности на примере ТЭЦ с ГСП и ФТТ с турбиной Т-180. При расчетах были приняты следующие величины: стоимость газа 80 дол./т.у.т., угля – 35 \$/т.у.т.; тариф на отпускаемую электроэнергию от ТЭЦ равен 0,04 \$/кВт·ч, тариф на отпускаемую теплоэнергию – 0,03 \$/кВт·ч. Норма дисконта, устанавливаемая с учетом источников и структуры финансирования, требований инвесторов и отражающая приемлемую норму (ставку, процент) доходности на вкладываемый капитал принята на уровне 15%, штатный коэффициент принят 1,7 чел/МВт.

Было показано, что вариант строительства энергоблока ТЭЦ с ГСП и ФТТ является перспективным. Вложение инвестиций в энергоблок с ГСП и ФТТ является на 25 % выгоднее, чем в традиционный энергоблок, при этом срок окупаемости составил 4,2 года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана на основе дифференциального эксергетического подхода методика анализа эффективности функционирования ТЭЦ с ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ, в которой при определении эксергетической и технико-экономической эффективности ТЭЦ с ГСП и ФТТ используется два КПД: по отпуску электроэнергии и теплоэнергии.

2. Разработан алгоритм и математическая модель функционирования ТЭЦ с газосетевыми подогревателями и фреоновыми термотрансформаторами, в которые по сравнению с исходным вариантом математической модели функционирования ТЭЦ добавлены операторы расчёта конструктивно-компоновочных па-

раметров ФТТ и ГСП, операторы, моделирующие как функционирование ФТТ и ГСП в составе комбинированной системы теплоснабжения, так и работу ГСП параллельно с теплофикационным отбором, обеспечивающих отпуск тепла по графику нагрузки при пониженных температурах прямой и обратной сетевой воды, а также – совместную работу при отпуске электроэнергии паротурбинной ступенью и ГТУ с ГСП.

3. Приведены оптимальные значения давления и температуры острого пара, питательной воды для энергоблоков на базе ТЭЦ с ГСП и комбинированной системы теплоснабжения с ФТТ. Оптимальное давление острого пара с теплофикационными турбинами Т-50, Т-110, Т-175 находится на уровне 13 МПа и увеличивается до 28 МПа для Т-180, Т-250. Температура острого пара должна приниматься на уровне 540°С. Температура питательной воды для энергоблоков без промперегрева принимается на уровне 160-200 °С, а с промперегревом – на уровне 280-300 °С.

4. Впервые выполнена параметрическая оптимизация внутриквартальной ФТТ, работающей в комбинированной системе теплоснабжения с энергоблоками ТЭЦ-ГСП. При работе ТЭЦ-ГСП с теплофикационными турбинами Т-50...Т-175, оптимальные значения давления в испарителе ФТТ 0,62-0,82 МПа, в конденсаторе 2,5-2,7 МПа при оптимальном недогреве внутриквартальной сетевой воды 2-5°, а с Т-180...Т-250 – соответственно, 0,64-0,75 МПа и 2,65-2,7 МПа при оптимальном недогреве внутриквартальной сетевой воды 13-19°.

5. Показано, что эксергетическая эффективность парогазогенерирующей подсистемы при оптимальных параметрах ТЭЦ с ГСП и ФТТ в 1,2 – 1,3 раза выше эффективности традиционной ТЭЦ с ПВК. Эксергетическая эффективность сетевой установки с ГСП и фреоновыми термотрансформаторами по сравнению с традиционной установкой, примерно в два раза выше и находится на уровне 0,38-0,42.

6. Предложена и запатентована [10] новая тепловая схема и цикл ТЭЦ с ГСП и ФТТ и выполнены оптимизационные исследования. Эксергетический КПД ТЭЦ с ГСП и ФТТ по отпуску электроэнергии с теплофикационными турбинами Т-50... Т-175 находится на уровне 0,435-0,475, а с Т-180, Т-250 составляет 0,45-0,5. КПД по отпуску теплоэнергии составляет 0,16-0,185, что практически в два раза больше КПД традиционных ТЭЦ с ПВК.

7. Применение оптимального оборудования в составе ТЭЦ-ГСП-ФТТ позволяет повысить технико-экономическую эффективность в среднем на 7 %.

8. Удельные капиталовложения во фреоновый термотрансформатор при оптимальных параметрах составили 650-720 \$/кВт мощности фреонового термотрансформатора, что в 1,2 раза больше удельных капиталовложений при стандартных параметрах.

9. Показано, что вложение инвестиций в энергоблок ТЭЦ-ГСП-ФТТ по сравнению с традиционной ТЭЦ выгоднее на 25 %.

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. Францева А. А. Эффективность ТЭЦ с газосетевым подогревателем и комбинированной системой теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами / Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева, Б. Пашка // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2011. – № 1 (42). – С. 181–186.

2. Францева А. А. / Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева, Ф. А. Серант, В. Г. Томилов, Ю. В. Овчинников / Техничко-экономические показатели новой технологии комбинированного энергоснабжения с ПГУ и термотрансформаторами // Доклады АН ВШ РФ. – 2012. – №1(18). – С. 112-115.

3. Францева А. А. / Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева / Комбинированное теплоснабжение от ТЭЦ с газосетевыми подогревателями и термотрансформаторами // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Том 19. – №3 (75). – С.391-397.

Отраслевые издания, патенты и материалы конференций:

4. Францева А. А. Эффективность парогазовой ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения и фреоновыми термотрансформаторами / Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева, Бямбоцогт Пашка // Инновационная энергетика 2010: материалы второй научно-практической конференции с международным участием. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010. – С. 73-75.

5. Францева А. А. Эксергетический анализ ТЭЦ с ГСП с системой комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды XIII всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах – Томск, 19-22 апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011 – т. 2. Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. – С. 97-100.

6. Францева А. А. Эксергетический анализ ТЭЦ с ГСП и системой комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами. // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Состоя-

ние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – том 2. – С. 44-46.

7. Францева А. А. Эксергетический анализ ТЭЦ с ГСП и системой комбинированного теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т.3. – С. 277-278.

8. Францева А. А. Эксергетический анализ ТЭЦ с ГСП и комбинированной системой теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами / Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева, Пашка Бямбоцогт, // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011. – Вып. 16. – С. 108-118.

9. Францева А. А. Применение фреоновых термотрансформаторов при комбинированном теплоснабжении // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011. – Часть 2. – С. 182-184.

10. Пат. №110459, F24D 3/08. Система централизованного теплоснабжения / Г. В. Ноздренко, П. А. Щинников, А. А. Францева; ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет». – 2011128340/12; 08.07.2011; 20.11.2011. – С. 4.

11. Францева А. А. Комбинированное теплоснабжение от парогазовой ТЭЦ с фреоновыми термотрансформаторами / П. А. Щинников, Г. В. Ноздренко, О. К. Григорьева, А. А. Францева // Проблемы теплоэнергетики: сборник науч. трудов.– Саратов: СГТУ, 2012. – Выпуск 2. – С.77-84.

12. Францева А. А. Комбинированное теплоснабжение с ГСП и фреоновыми термотрансформаторами // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых. – Новосибирск: изд-во НГТУ. – 2012. – Часть 5. – С. 58-59.

13. Францева А. А. Комбинированное теплоснабжение с фреоновыми термотрансформаторами // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: сб. науч. тр 6 междунар. науч.-техн. конф. – Ульяновск: УлГТУ, – 2013. – С. 75-78.

14. Францева А. А. Комбинированное теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторам // Современные техника и технологии: сб. научн. тр 19 междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: изд-во ТПУ, 2013. – Т.3. – С. 261-262.

15. Францева А. А. Эффективность ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения. / Энергия-2013: сб. научн. тр. восьмой междунар. науч-тех. конференции. – Иваново: УИУНЛ ИГЭУ, 2013. – Т.1, Ч.1. – С. 60-64.

16. Францева А. А. Применение фреоновых термотрансформаторов в составе комбинированного теплоснабжения от ТЭЦ с ГСП // Состояния и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): материалы междунар. науч.-технич. конференции.– Иваново, 2013. – Т.2. – С. 205-207.

17. Францева А. А. Оптимальные показатели ТЭЦ в системе комбинированного теплоснабжения. // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. научн. конференции молодых ученых, Новосибирск, 21-24 ноября 2013. – Новосибирск: изд-во НГТУ. – Ч.5. – С. 88-90.

18. Францева А. А. Показатели эффективности ТЭЦ с фреоновыми термотрансформаторами. // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы III-й междунар. науч.-практич. конференции, Курск, 18 октября – Курск, 2013. – Т3. – С. 324-327.

19. Францева А. А. Оптимальные параметры ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения и влияние на них цены топлива // Фундаментальные проблемы технических наук: сборник статей междунар. научн.-практич. конференции. – Уфа, 2014. – С. 151-153.

20. Францева А. А. Оптимизационные исследования ТЭЦ в составе комбинированной системы теплоснабжения с фреоновыми термотрансформаторами / А. А. Францева, П. А. Щинников // Проблемы теплоэнергетики: сборник науч. трудов.– Саратов: СГТУ, 2014. – Выпуск 3. – С.99-103.

21. Францева А. А. Оптимизация параметров фреонового термотрансформатора в системе комбинированного теплоснабжения / А. А. Францева // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. научн. конференции молодых ученых, Новосибирск, 02-06 декабря 2014 г. - Новосибирск: изд-во НГТУ. – Ч.5. – С. 55-57.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 x 84 1/16 объем 1,5 п. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1139 подписано в печать 20.07.2015