

На правах рукописи



СИНЕЛЬНИКОВ
Денис Сергеевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭЦ В УСЛОВИЯХ
ЗОНИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАФИКА**

Специальность 05.14.14 – тепловые электрические станции,
их системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

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 кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция», г. Ульяновск

Огуречников Лев Александрович
доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
«Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук»,
главный научный сотрудник отдела физической
гидродинамики, лаборатория проблем
теплопереноса, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт систем энергетики им.
Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук», г. Иркутск

Защита диссертации состоится «20» декабря 2019 года в 15⁰⁰ часов на
заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском
государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск,
пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан « » октября 2019 г.

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



Александр Васильевич Чичиндаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Россия имеет колоссальный масштаб централизации теплоснабжения, при этом генерирующее оборудование работает в широком спектре климатических зон, каждая из которых имеет свои особенности (среднегодовая температура, средняя температура самого холодного месяца, продолжительность стояния температур наружного воздуха). Теплофикация является наиболее эффективным технологическим решением, которое адекватно отражает условия уникального климата России. Проблемы, с которыми сталкивается современная энергетика в области теплоснабжения, часто связаны с физическими условиями работы отопительного оборудования. Однако, простое техническое переоснащение генерирующих и теплопередающих компаний не решает проблем с потреблением энергоресурсов. Часто на электростанциях установлено оборудование разного типа, например, теплофикационные турбины, турбины с производственным отбором пара и турбины с противодавлением. Единичная мощность блоков, представленных на теплоэлектроцентралях, составляет линейку от 20 МВт до 250 МВт. Теплоэлектроцентраль вынуждена обеспечивать разнородную нагрузку, поэтому использование современных энергосберегающих технологий является необходимым условием для решения актуальных проблем и залогом устойчивого развития отрасли.

С другой стороны, перед каждой станцией стоит задача повышения эффективности, которая может обеспечиваться наиболее выгодным сочетанием работающего оборудования и заданных нагрузок с учетом действующих климатических условий.

Объект исследования: теплофикационные энергоблоки ТЭЦ, работающие в условиях зонированного температурного графика.

Предмет исследования: комплексная оптимизация теплофикационных энергоблоков ТЭЦ в условиях зонированного температурного графика с определением наилучших сочетаний параметров циклов и схемных решений, а также их теоретическое обоснование.

Целью работы является повышение эффективности работы теплофикационных энергоблоков ТЭЦ, работающих в условиях зонированного температурного графика.

Задачи исследования:

1. Разработка методов определения эквивалентной расчетной температуры для теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика и тепловых нагрузок.

2. Развитие методологии комплексного оптимизационного исследования теплофикационных энергоблоков на основе эксергетической функции, работающих в условиях зонирования температурного графика.

3. Разработка программно-вычислительного комплекса для оптимизационных расчетов теплофикационных энергоблоков.

4. Проведение оптимизационных исследований для теплофикационных энергоблоков.

5. Разработка рекомендаций по загрузке энергоблоков ТЭЦ разного типа в условиях обеспечения фактического температурного графика.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые разработана методика определения эквивалентных расчетных температур и тепловых нагрузок при зонировании температурного графика, которая включена в процедуру оптимизации пара метров энергоблоков ТЭЦ и получены новые результаты, характеризующие их работу.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика определения эквивалентных расчетных температур и тепловых нагрузок при зонировании температурного графика.

2. Методика оптимизации параметров ТЭЦ в условиях зонирования температурного графика, которая включает алгоритм расчета тепловой схемы и учитывает внутренние и внешние ограничения.

3. Программно-вычислительный комплекс «ТерпOZON», включающий процедуру оптимизации, расчет тепловой схемы энергоблоков, расчет свойств воды и водяного пара, учет зонирования температурного графика.

4. Результаты оптимизационных расчетов по определению термодинамических параметров, особенностей схемных решений и распределению нагрузки агрегатов ТЭЦ разного состава и мощности.

5. Анализ устойчивости оптимальных решений для 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 результаты 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, так и вновь проектируемых электростанций.

Личный вклад автора. Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены

лично автором. Анализ и обсуждение полученных результатов проведен автором совместно с научным руководителем.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обосновывается использованием апробированных методов эксергетического анализа и фундаментальных законов термодинамики. Для всех полученных выводов приведены численные данные по результатам компьютерных экспериментов с использованием разработанной модели. Применены данные типовых турбин, широко распространенных на территории РФ и стран СНГ. Исследованы фактические показатели работы, действующей ТЭЦ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2016, 2017, 2018); «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, 2017, 2018); «Aspire to Science» (Новосибирск, 2017, 2018); «Повышение энергоэффективности объектов энергетике и систем теплоснабжения» (Омск, 2018); 13th International Forum on Strategic Technology «IFOST» (Харбин, 2018); «XXXV Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2019); научных семинарах НГТУ (2016-2019).

Публикации. 17 печатных трудов, в том числе в рецензируемых журналах – 3 (из них по перечню ВАК – 2, по перечню Scopus/WoS – 1); свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ – 4; в сборниках научных трудов и по материалам конференций – 10.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (134 наименования), двух приложений. Основной текст изложен на 127 страницах, содержит 47 иллюстраций и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана краткая формулировка проблемы оптимизации теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика.

В **первой главе** рассмотрены современные методы и подходы к решению задач повышения эффективности систем теплоснабжения. Проанализированы существующие способы исследования температурного графика тепловых электрических станций и перспективные схемы теплоснабжения. Показано, что работа ТЭЦ сегодня характеризуется потерей потребителя, а развитие систем теплофикации связано с их децентрализацией. Показаны работы отечественных ученых в данной области (Николаев Ю.Е., Францева А.А., Андрющенко А.И., Ларин Е.А., Франк М.И., Огуречников А.А., Петин Ю.И., Накоряков В.Е. и др.). Отмечен зарубежный опыт. Показаны актуальные задачи оптимизации в области теплоснабжения, при этом отмечены работы Аминова Р.З., Клера А.М., Стенникова В.А., Ноздренко

Г.В., Щинникова П.А., Зыкова В.В. и др. Отражены работы, посвященные температурному графику. Отмечены работы Гершковича В.Ф., Панферова В.И., Корягина А.В., Чичерена С.В., Шарапова В.И., Ротова П.В., Орлова М.Е. и др. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во **второй главе** описываются принципы зонирования температурного графика тепловых электрических станций. Представлен разработанный метод определения эквивалентной расчетной температуры, который учитывает режимные особенности работы теплофикационных энергоблоков в виде способа регулирования отпуска теплоты через зонирование температурного графика. Показано, что при зонировании температурного графика следует иметь три расчетных точки. На примере теплофикационного энергоблока на базе турбины Т-180 показано, что учет способа регулирования отпуска теплоты за счет зонирования температурного графика ведет к отклонению расчетного отпуска теплоты на 5-25 % по сравнению с расчетом в традиционной инженерной постановке.

Методические особенности такого подхода следующие. Годовая теплофикационная нагрузка $Q_{ТЭЦ}$, полученная как интегральная характеристика с учетом времени τ стояния температуры $t_{вз}$, для условий зонирования температурного графика, имеет три характерных зоны (Рисунок 1). Первая зона обусловлена количественным регулированием отпуска теплоты, вторая зона – качественно-количественным (смешанным) регулированием, третья – качественным.

Текущие значения тепловых нагрузок определяют по выражению:

$$Q_i = Q_{ГВС} + \frac{18 - t_i}{18 - t_*} \cdot (Q_{ТЭЦ} - Q_{ГВС}); \quad (1)$$

где $Q_{ТЭЦ}$, $Q_{ГВС}$ – нагрузки горячего водоснабжения и теплофикационные; t_i , t_* – текущая и расчетная температура воздуха соответственно.

Годовая теплофикационная нагрузка ТЭЦ:

$$Q_{ТЭЦ} = Q(t)d\tau; \quad (2)$$

где τ – время стояния температур.

В инженерной практике существует прием, когда годовой отпуск теплоты определяют по двум режимам (зима/лето), при этом летний режим работы определяется нагрузкой ГВС ($Q_{ГВС}$, Рисунок 1), а зимний режим работы обуславливает весь теплофикационный отпуск теплоты:

$$Q_{ТЭЦ}^{ЗИМА} = Q_{ТЭЦ} - Q_{ГВС}. \quad (3)$$

В этом случае, $Q_{ТЭЦ}^{ЗИМА}$ определяют по средней температуре отопительного периода $(\frac{8 + t_*}{2})$, Рисунок 1.

Тогда годовой отпуск теплоты теплофикационной турбиной:

$$Q_{\text{от}}^{\text{год}} = Q_{\text{ТЭЦ}} \cdot \tau_{\text{от}} \cdot \left(\frac{1}{1 - \bar{Q}} \right)^n \cdot (\bar{Q} - \bar{Q}_{\text{min}}) - Q_{\text{ПИК}}^{\text{год}} + Q_{\text{ГВС}} \cdot (8760 - \tau_{\text{от}}). \quad (4)$$

Относительная нагрузка ТЭЦ за отопительный период:

$$\bar{Q} = \left(1 - \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}} \right) \cdot \frac{18 - t_{\text{вз}}^{\text{cp}}}{18 - t_*} + \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}}; \quad (5)$$

где $t_{\text{вз}}^{\text{cp}}$ – средняя за отопительный период ($\tau_{\text{от}}$) температура окружающей среды.

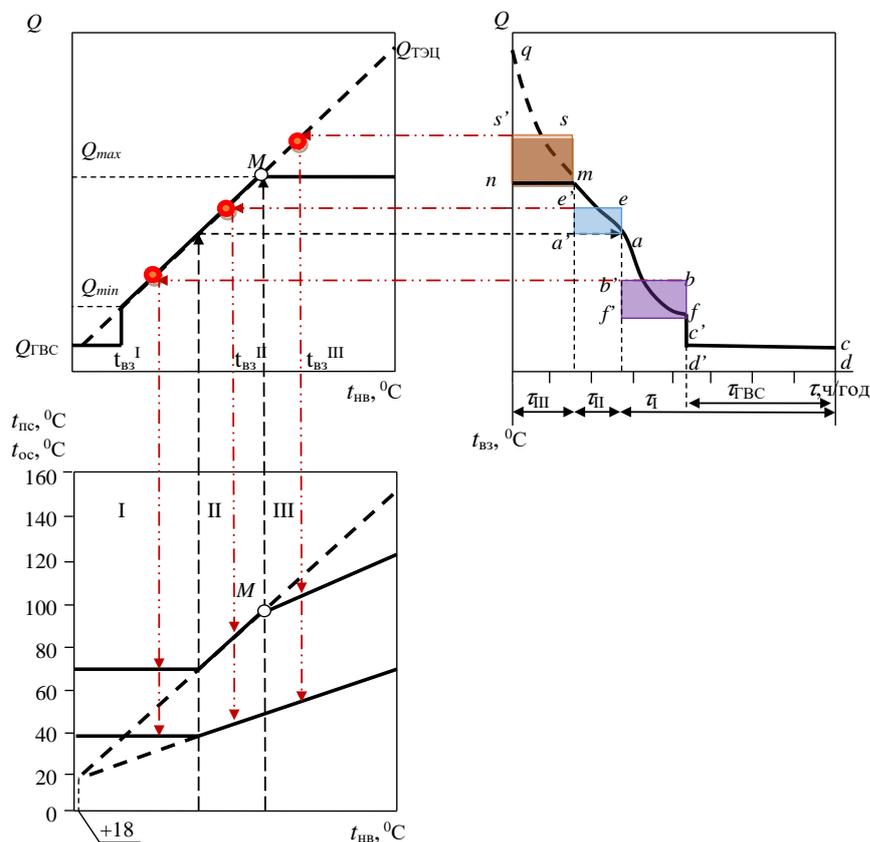


Рисунок 1 – Графики тепловых нагрузок

Показатель степени:

$$n = \frac{1 - \bar{Q}_{\text{min}}}{\bar{Q} - \bar{Q}_{\text{min}}}. \quad (6)$$

Годовой отпуск теплоты в условиях зонирования температурного графика может быть определен аналогичным способом, однако в этом случае выражение (5) примет вид системы:

$$\begin{cases} \bar{Q}_I = \left(1 - \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}} \right) \cdot \frac{18 - t_{\text{вз}}^I}{18 - t_*} + \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}}; \\ \bar{Q}_{II} = \left(1 - \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}} \right) \cdot \frac{18 - t_{\text{вз}}^{II}}{18 - t_*} + \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}}; \\ \bar{Q}_{III} = \left(1 - \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}} \right) \cdot \frac{18 - t_{\text{вз}}^{III}}{18 - t_*} + \frac{Q_{\text{ГВС}}}{Q_{\text{ТЭЦ}}}. \end{cases} \quad (7)$$

В этих выражениях $t_{вз}^{I,II,III}$ – расчетные температуры воздуха характерных зон графика тепловых нагрузок (Рисунок 1).

Выражение (4), в свою очередь, примет вид:

$$Q_{от}^{год} = \sum_i^{i=3} Q_{ГЭЦ} \cdot \tau_{от} \cdot \left(\frac{1}{1 - \bar{Q}_{min}} \right)^n \cdot (\bar{Q} - \bar{Q}_{min}) - Q_{ПИК}^{год} + Q_{ГВС} \cdot \tau_{ГВС}; \quad (8)$$

где $i=1,2,3$ – соответствует времени $\tau_I, \tau_{II}, \tau_{III}$.

Расчетная температура воздуха $t_{вз}^i$ определяется как эквивалентная температура, при которой обеспечивается отпуск теплоты по графику тепловых нагрузок в соответствующей зоне регулирования, то есть выполняется условие равенства площадей (Рисунок 1).

$$\begin{cases} F(aff') = F(f'b'bf) - \text{зона количественного регулирования;} \\ F(a'm'a) = F(ae'ea) - \text{зона смешанного регулирования;} \\ F(nqm) = F(ns'sm) - \text{зона качественного регулирования.} \end{cases} \quad (9)$$

При таком подходе в эквивалент расчетной температуре ставится годовой отпуск теплоты, отпущенной с тем или другим способом регулирования. Такой подход обеспечивает связь между теплотой и разными группами оборудования, задействованными в ее отпуске.

В **третьей главе** представлен эксергетический метод анализа теплоэнергетических установок. Обеспечено развитие эксерго-агрегативного метода исследования ТЭУ путем введения в него процедур, учитывающих способ регулирования отпуски теплоты через зонирование температурного графика. Разработан программно-вычислительный комплекс «ТерпОZON», предназначенный для ведения расчетов теплофикационных энергоблоков с учетом способа регулирования отпуски теплоты через зонирование температурного графика, алгоритм которой представлен на Рисунке 2.

Целевая функция представлена как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min[\eta_{ji}(x, y)]^{-1}, \\ x, y \in R^n \end{array} \right\} \quad i = 1, 2, 3; \quad \varphi(\omega) = 0; \quad \psi(c) \leq c_i \quad (10)$$

Здесь $x \in X$ – независимые параметры и показатели; $y \in Y$ – зависимые параметры и показатели; $i=1,2,3$ – режимы отпуски теплоты, учитывающие способ регулирования (зоны температурного графика); $\varphi(\omega)$ – логико-числовой оператор функциональных отношений; $\psi(c)$ – оператор-функция учета ограничений; $\omega = (x, y, G, R^n, L, T)$ – информационная структура исследуемого теплофикационного энергоблока; G – множество параметров и показателей, характеризующих структуру ЭА – системы исследуемого энергоблока; L – множество логических и управляющих параметров программы вычислительного комплекса (коды и правила

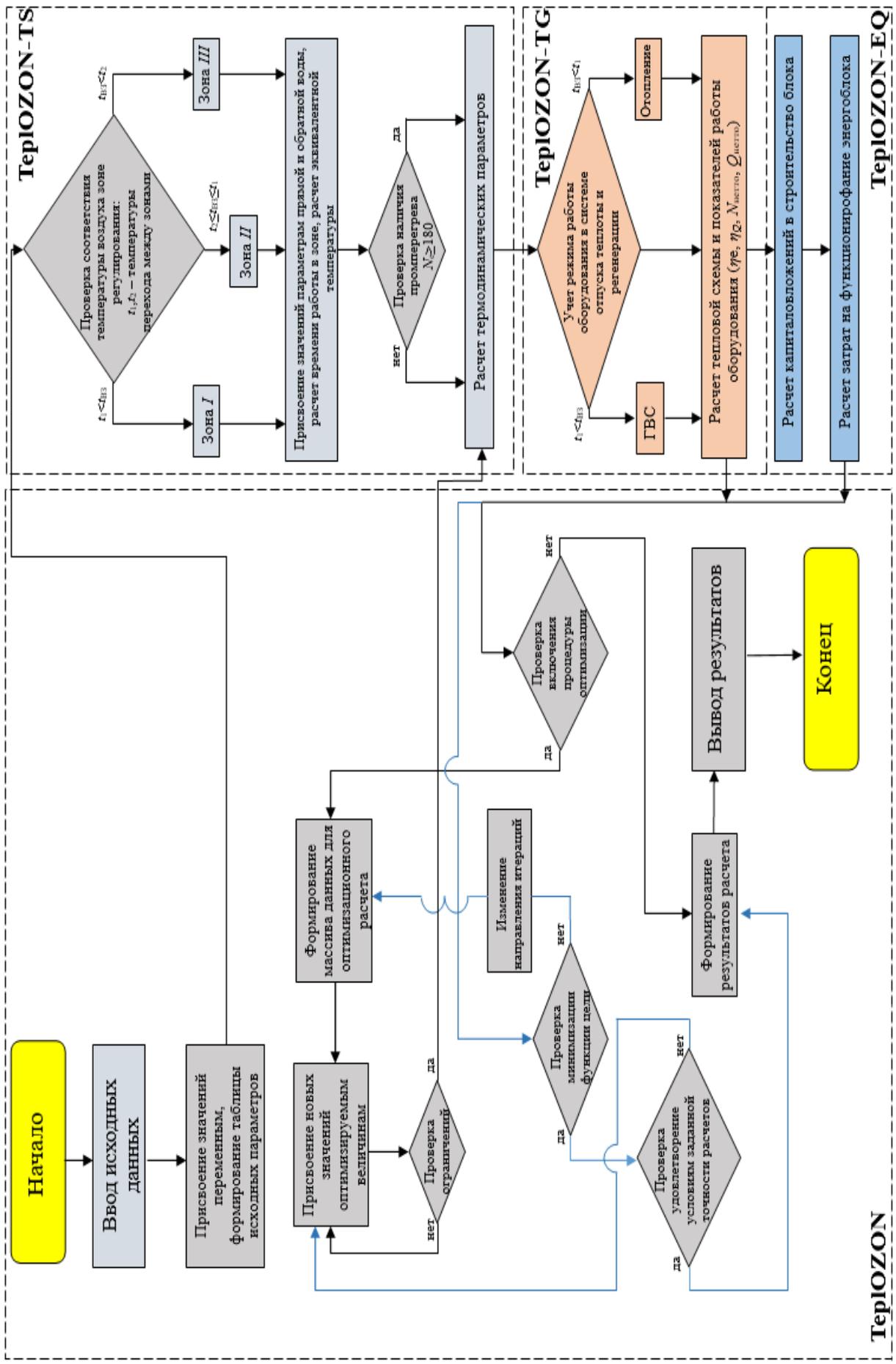


Рисунок 2 – Алгоритм работы программно-вычислительного комплекса

построения программы); R^n – пространство размерностью n , объединяющих все выше представленные значения параметров и показателей; n – размерность пространства, обусловленная количеством оптимизируемых параметров; T – множество, характеризующее особенности работы теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика.

Множество T представлено следующим образом:

$$T = \{p_0, t_0, t_{п.в}, t_{пш}, p_k, \alpha_{ТЭЦ}, t_{п.с}, t_{о.с}, t_*, t_{н.в}, t_{экв}, \tau_i, N_i, Q_i, p_{отб}, G_{отб}\}. \quad (11)$$

Здесь p_0 – давление острого пара; $t_0, t_{п.в}, t_{пш}, t_{п.с}, t_{о.с}, t_*, t_{н.в}, t_{экв}$ – температура острого пара, пара промперегрева, питательной воды, прямой и обратной сетевой воды, расчётной окружающей среды по климатической зоне, наружного воздуха, эквивалентной расчетной в зоне температурного графика соответственно; p_k – давление в конденсаторе, $\alpha_{ТЭЦ}$ – коэффициент теплофикации, τ_i – число часов использования установленной мощности в зоне температурного графика; N_i, Q_i – электрическая и тепловая нагрузка в зоне температурного графика; $p_{отб}, G_{отб}$ – давление и расход в производственном отборе.

Таким образом, целевая функция (η_{zi}) учитывает весь комплекс факторов, принятых к рассмотрению для теплофикационных энергоблоков в рамках модели, разработанной на кафедре ТЭС НГТУ в прежние годы, а так же отражает новый фактор – зонирование температурного графика.

Фрагменты программного кода, учитывающие зонирование температурного графика при расчете тепловой схемы энергоблока, представлены на Рисунке 3.

```

COMMON/OBEL/MNNN, TGR, TGBIX, TAY
C, CHZO, QDELTA, BIN, VOB, SICC, QSSY, QFIZ
C
C---(1)--- Учет мепловых режимов
TB3M = 20 - 59 * ALFAT
ICODA=1
C
C---(N)--- Определение коэффициентов нагрузки (одновременно номинальной)
FING = NTEK / NG
IF (QTH .NE. 0) THEN
  FIQT = QTEK / QTH
ELSE
  FIQT = 1
ENDIF
IF (DXNOM .NE. 0) THEN
  FIDX = DTEX / DXNOM
ELSE
  FIDX = 1
ENDIF
C
C---(N)--- Вывод результатов
IF (ICODA.NE. 2)
  WRITE (*, 'FING=', E12.6, '3X, "FIQT=", E12.6,
  '3X, "FIDX=", E12.6,
  ) FING, FIQT, FIDX
C
C---(N)--- Учет зонирования графиков t-нагрузок
с учетом числа часов использования режима
в условиях зонирования графика
мелловых нагрузок
TPS = 150
TOS = 70
IF (TGZON .EQ. 1) THEN
IF (TB3 .GT. 11 .OR. TB3 .EQ. 11) THEN
  TPS = 70
  TOS = 40
  TB3M = (TB3 - 8)/2
  TAUN = 0.389*TAUN
ENDIF
IF (TB3 .LT. 10 .AND. TB3 .GT. -17) THEN
IF (TB3 .LE. 85)
  TOS = 45
  TB3M = (TB3 - 11)/2
  TAUN = 0.325*TAUN
ENDIF
IF (TB3 .LE. -18) THEN
  TPS = 105
  TOS = 55
  TB3M = (TB3 - 39)/2

```

```

C
C---(1)--- Учет мепловых режимов
C
IF (TTP .EQ. 0.) THEN
  HPP = 3000.
  SPP = 7.
ELSE
  QPP = 0.001 * (TTP + 273.15)
  TAUPP = (TTP + 273.15) / 647.3
  PPP = 0.0132 * P0
  HPP = 4.187 * (503.43 + 11.02849 * ALOG(TAUPP)
  + 229.2569 * TAUPP + 37.93129 * TAUPP**2
  + (0.758195 - 7.97826 / (QPP**2)
  - (3.078455 * QPP - 0.21549) / (QPP - 0.21)**3) * PPP
  + (0.0644126 - 0.268671 / QPP**8 - 0.216661 * 10.**(-2)
  / QPP**12) * PPP**2)
  SPP = 4.187 * (-0.01703764 / TAUPP
  + 1.9238552 + 0.3541726 * ALOG(TAUPP)
  + 0.11719826 * TAUPP - 0.1102299 * ALOG(100*PPP)
  - (5.855692 * 10.**(-4) + 5.318842 * 10.**(-3) / QPP**3
  + 2.052303 * 10.**(-3) / (QPP - 0.21)**3) * PPP**2
  - (2.388186 * 10.**(-4) / QPP**9
  + 20.26538 * 10.**(-7) / QPP**15) * PPP**2)
  SPP = ABS(SPP)
ENDIF
QST = 1 / (2.6864264
  - 0.20096551
  - 2.16688 * 10.**(-3) * (ALOG(10 * PT))**2
  - 9.480808 * 10.**(-5) * (ALOG(10 * PT))**3
  + 6.135062 * 10.**(-6) * (ALOG(10 * PT))**4
  + 3.6917245 * 10.**(-6) * (ALOG(10 * PT))**5)
S11T = 4.187 * (7.07179
  - 31.707554 * QST
  + 40.129466 * QST**2
  + 146.93427 * QST**3
  - 575.48983 * QST**4
  + 746.50772 * QST**5
  - 351.27926 * QST**6)

```

Рисунок 3 – Фрагменты программного кода вычислительного комплекса TeploZON-TS

В четвертой главе проведены оптимизационные исследования теплофикационных энергоблоков. Показан прирост эксергетического КПД системы отпуска теплоты для теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика. Проверена устойчивость оптимальных решений для зоны количественного регулирования температурного графика при разукрупнении графика электрической нагрузки. Показано, что при создании новых теплофикационных энергоблоков следует учитывать не только их мощность и теплофикационные нагрузки, но и зону температурного графика, в которой планируется его работа, так как от этого фактора зависит структурная схема энергоблока.

На Рисунке 4 приведены оптимальные параметры острого пара и пара пром-перегрева Т- и ПТ-энергоблоков ТЭЦ при зонировании температурного графика.

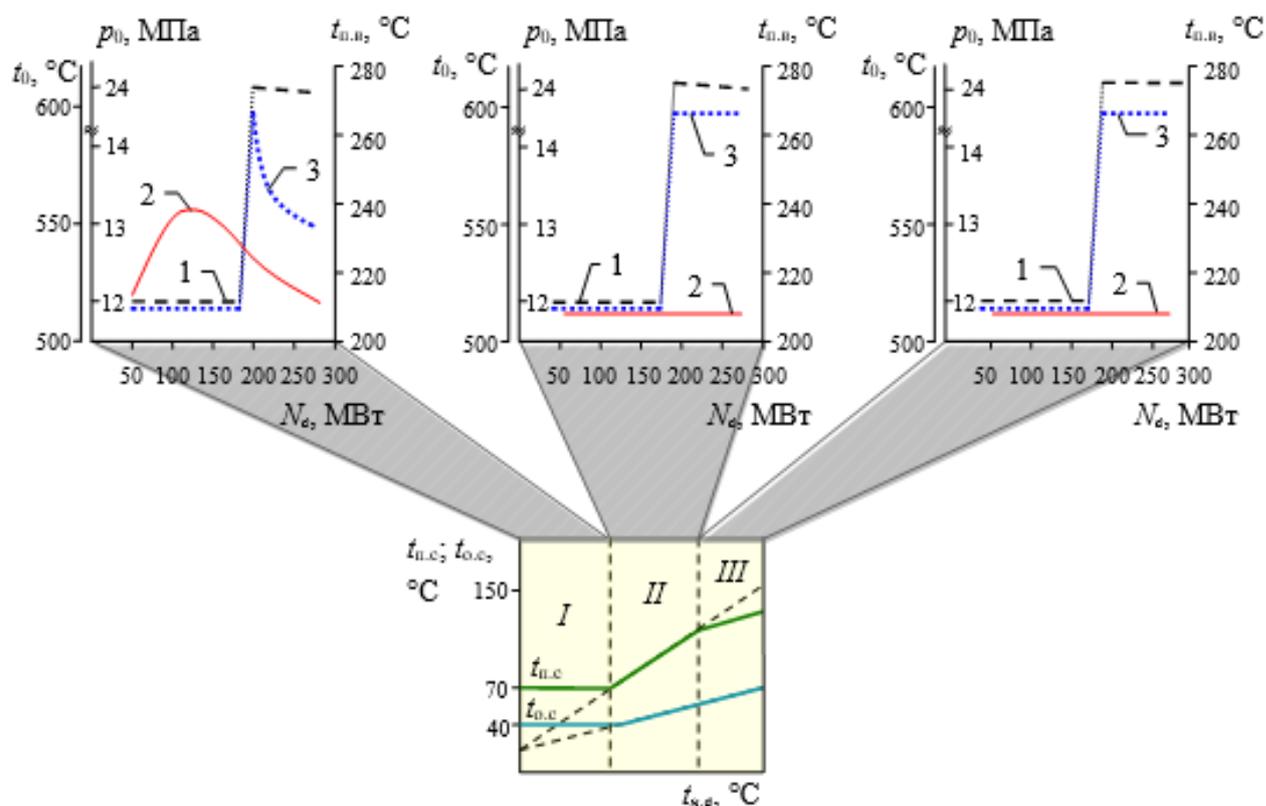


Рисунок 4 – Оптимальные параметры (p_0 , t_0 , $t_{п.в}$) теплофикационных энергоблоков в разных зонах температурного графика: p_0 – давление острого пара (линия 1); t – температура острого пара (линия 2); $t_{п.в}$ – температура питательной воды (линия 3); I, II, III – зоны количественного, смешанного и качественного регулирования;

При формировании массива исходных данных использованы характеристики типовых турбин заводов УТЗ, ЛМЗ. Использовались турбины с теплофикационным отбором пара типа Т (Т-50, Т-110, Т-120, Т175, Т-180, Т-250, Т-265) и турбины с производственным и теплофикационным отбором пара типа ПТ (ПТ-30, ПТ-50, ПТ-65, ПТ-80, ПТ-135). Для приведения блоков к сопоставимому виду применялись следующие принципы зонирования:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{тек}} = N_{\text{ном}}, Q_{\text{тек}} = 0,15 \cdot Q_{\text{ном}} - \text{зона I}; \\ N_{\text{тек}} = 0,75 \cdot N_{\text{ном}}, Q_{\text{тек}} = 0,75 \cdot Q_{\text{ном}} - \text{зона II}; \\ \left\{ \begin{array}{l} N_{\text{тек}} = 0,8 \cdot N_{\text{ном}}, Q_{\text{тек}} = Q_{\text{ном}} - \text{для Т-турбин} \\ N_{\text{тек}} = 0,75 \cdot N_{\text{ном}}, Q_{\text{тек}} = Q_{\text{ном}} - \text{для ПТ-турбин} \end{array} \right\} - \text{зона III.} \end{array} \right. \quad (12)$$

Видно, что для работы в составе ТЭЦ с зонированием температурного графика давление острого пара (начальное давление) для Т- и ПТ-энергоблоков без промперегрева должно приниматься на уровне 12 МПа, а с промперегревом – 24 МПа. При этом температура острого пара лежит на уровне 510 °С. Такие параметры обусловлены в первую очередь снижением давления в Т-отборе в течение всего отопительного периода. При этом пониженное, по сравнению со стандартным, давление (12 МПа) в сочетании с меньшим давлением в Т-отборе обеспечивает такой теплоперепад на турбину при одновременном увеличении пропуска пара в ЦНД, который практически не изменяет отпуска электроэнергии и повышает коэффициент готовности энергоблоков. Вместе с тем, при увеличении мощности энергоблоков без промперегрева за счет повышения начальной температуры пара, по сравнению со стандартными значениями, растет теплоперепад, что уменьшает расход пара на турбину и снижает расход топлива на котел при прочих равных условиях. Оптимальные энергоблоки с промперегревом имеют стандартное начальное давление пара на уровне 24 МПа при температуре острого пара 510 °С.

Такая температура пара обеспечивает необходимые коэффициенты готовности энергоблоков. Параметры блоков с промперегревом характеризуются высокими (по сравнению с традиционными блоками) давлением и низкой температурой промперегрева пара (Рисунок 4). В целом можно считать, что параметры острого пара незначительно отличаются от стандартных значений при некотором снижении оптимальной t_0 .

Оптимизация параметров Т-энергоблоков ТЭЦ с зонированием температурного графика по сравнению с традиционной ТЭЦ увеличивает эксергетическую эффективность по отпуску электроэнергии для первой зоны на 3...10 %, причем для Т-энергоблоков без промперегрева оптимизация позволяет увеличить КПД на 3...5 %, для второй зоны на 3 % для Т-энергоблоков с промперегревом и около 5 % для Т-энергоблоков без промперегрева. В третьей зоне для Т-энергоблоков с промперегревом прирост эффективности составляет около 5 %. Для ПТ-энергоблоков в первой зоне прирост эксергетического КПД на электроэнергию и теплоэксергию составляет около 7 %, для второй и третьей около 5 %.

Блоки разного типа (Т и ПТ) показывают разные показатели экономии топлива в разных зонах температурного графика (Рисунок 5). Можно видеть, что в зоне I, при загрузке оборудования предпочтение следует отдавать энергоблокам

типа ПТ, в зоне III более выгодны энергоблоки типа Т, а в зоне II блоки Т и ПТ работают с равной эффективностью.

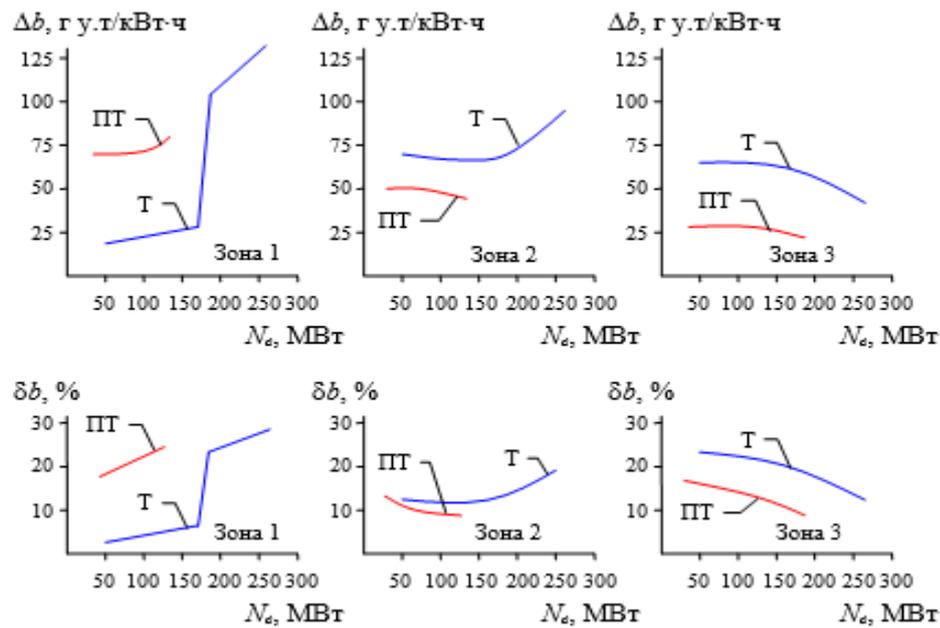


Рисунок 5 – Экономия удельного расхода топлива (b) на отпущенную эксергию при оптимизации параметров теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика: Δb – удельная экономия условного топлива; δb – относительная экономия условного топлива

Совокупный эффект от применения зонирования температурного графика для блоков без промперегрева составляет около 10 %, а для энергоблоков с промперегревом около 20 % (Рисунок 6). При этом, в зависимости от мощности турбины, экономия составляет от 10 до 150 тыс. т.у.т/год.

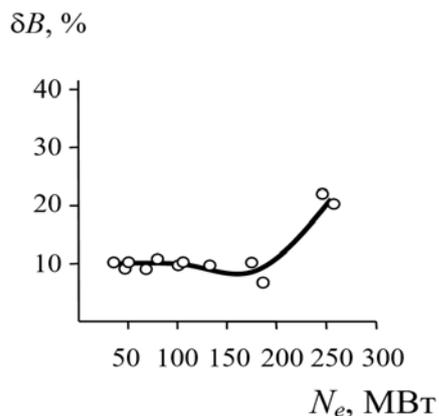


Рисунок 6 – Относительная экономия топлива при зонировании температурного графика в зависимости от единичной мощности энергоблоков

Оценка структурного и технико-экономического эффектов для теплофикационных энергоблоков выполнена на основе затратной функции, зависящей от числовых переменных, графа энергоблока, множества внешних связей энергоблока, логических параметров. При этом, каждая функциональная часть (агрегат) энергоблока характеризуется затратами в ее создание, а также затратами, переносимыми с материальными потоками по связям между частями. Совокупный относительный критерий технико-экономической эффективности представлен в виде:

$$\beta = \frac{Z_{\text{опт}}}{Z}; \quad (13)$$

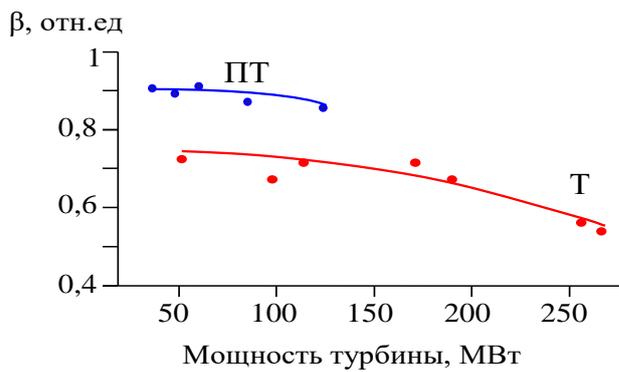


Рисунок 7 – Преимущество зонирования температурного графика для теплофикационных энергоблоков разного типа

блоки любого типа.

Кроме того, проведена оценка устойчивости оптимальных параметров энергоблоков ТЭЦ в условиях разуплотнения графиков нагрузок для первой зоны температурного графика. В целом удельные расходы топлива изменяются на 5...20 %, что отражает типовое поведение энергоблоков при снижении нагрузки и показывает устойчивость оптимальных решений.

где $Z_{\text{онт}}$ – суммарные затраты в создание и функционирование теплофикационного энергоблока при оптимизации параметров; Z – суммарные затраты энергоблок.

Можно видеть, что наибольший эффект (Рисунок 7) от оптимизации параметров ТЭЦ в условиях зонированного температурного графика получают с одной стороны энергоблоки типа Т, с другой – мощные энерго-

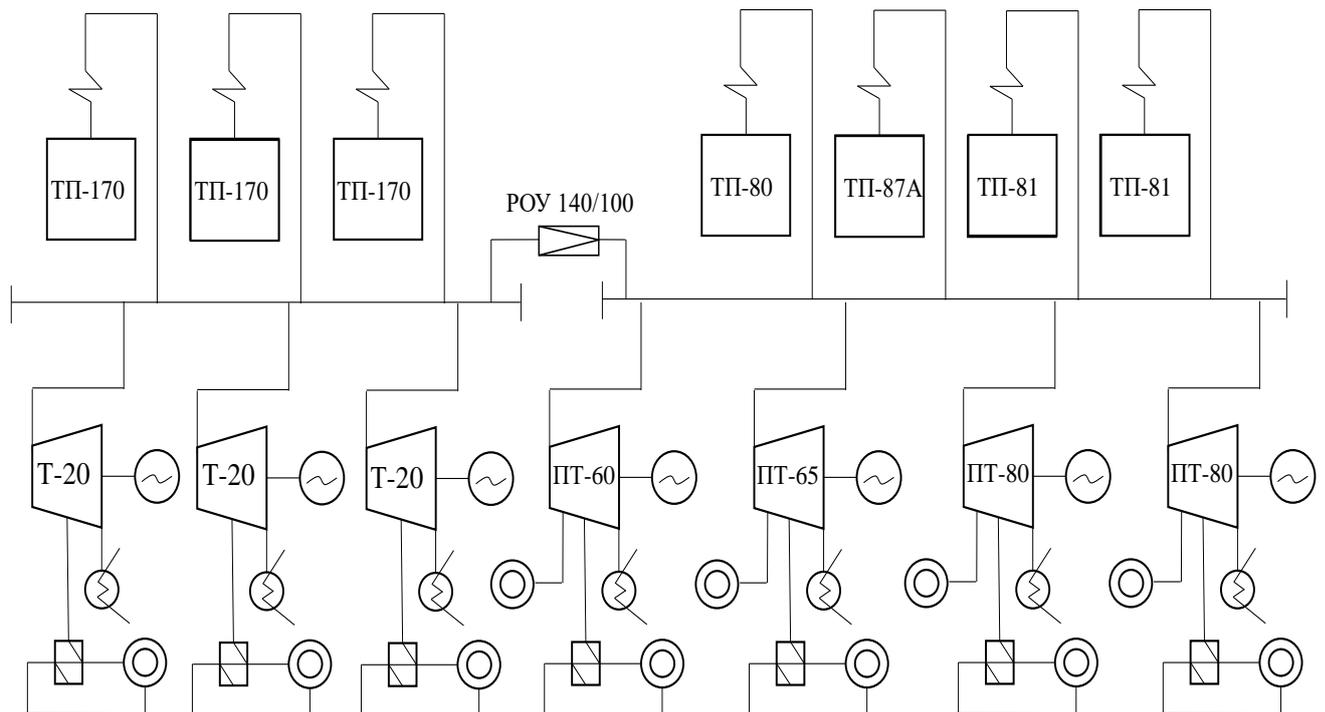


Рисунок 8 – Принципиальная тепловая схема НТЭЦ-2

В пятой главе определена технико-экономическая эффективность при распределении нагрузки ТЭЦ с учетом зонирования температурного графика.

Проведен анализ функционирования действующей электростанции, а именно Новосибирской ТЭЦ-2 (Рисунок 8). В расчетах принимается, что котельное и турбинное оборудование, используемое в каждом месяце, находилось в работе полный месяц без пусков и остановов.

В результате моделирования режимов работы энергоблоков ТЭЦ получим некоторую экономию топлива:

$$\Delta B = B - B_{\text{зон}}; \quad (14)$$

где B – фактический расход топлива по данным формы 3-тех НТЭЦ-2, кг/с; $B_{\text{зон}}$ – расход топлива, полученный в результате расчета с учетом зонирования температурного графика, кг/с.

Экономия топлива на ТЭЦ составит:

$$\Delta B_{\text{ТЭЦ}} = \sum_n \Delta B; \quad (15)$$

где n – число блоков на ТЭЦ.

В расчетах в качестве режимного показателя принято средневзвешенное значение расходов и параметров в течение календарного месяца с разделением на зимние и летние условия эксплуатации. Зимние месяцы характеризуют теплофикационные графики нагрузок, а летние – электрические графики нагрузок.

Экономический эффект определяется с учетом стоимости топлива, руб.:

$$\mathcal{E} = C_{\text{т}} \cdot \Delta B_{\text{ТЭЦ}}. \quad (16)$$

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

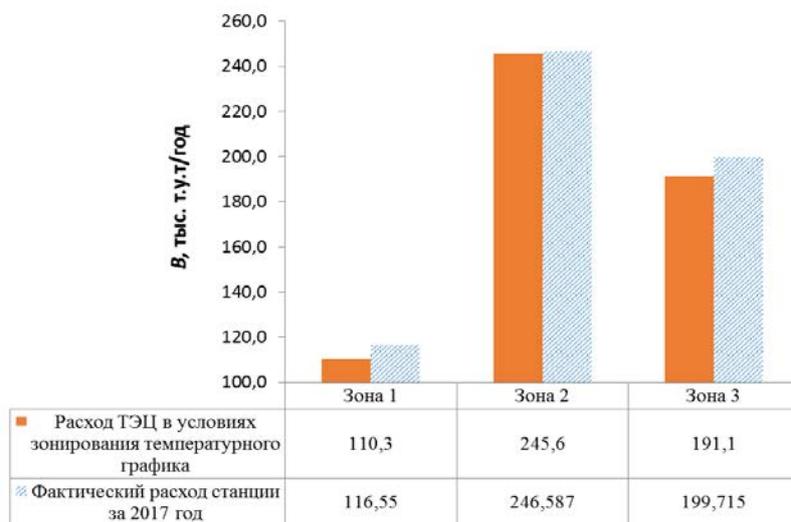


Рисунок 9 – Абсолютный годовой расход топлива на ТЭЦ в условиях зонирования температурного графика и при различной загрузке оборудования

в размере 19-31 млн. руб.

Фактически, для исследуемой ТЭЦ показатель \mathcal{E} является некоторой упущенной выгодой в рассматриваемом году.

Можно видеть, что в каждой зоне графика наблюдается эффект, при этом совокупная годовая экономия топлива составит 15,8 тыс. т у.т./год (Рисунок 9).

При условии стоимости топлива 1200-2000 руб./т у.т., эффект от применения технологии можно ожидать в

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для работы ТЭЦ в условиях зонированного температурного графика разработан метод определения эквивалентной расчетной температуры, который учитывает режимные особенности теплофикационных энергоблоков в виде способа

регулирования отпуска теплоты. Показано, что при зонировании температурного графика следует иметь три расчетных точки. На примере теплофикационного энергоблока Т-180 показано, что учет способа регулирования отпуска теплоты ведет к отклонению расчетного отпуска теплоты на 5-25 % по сравнению с расчетом в традиционной постановке.

2. Обеспечено развитие эксерго-агрегативного метода исследования ТЭУ, разрабатываемого на кафедре ТЭС НГТУ путем введения в него процедур, учитывающих способ регулирования отпуска теплоты через зонирование температурного графика.

3. Разработан программно-вычислительный комплекс, предназначенный для ведения оптимизационных расчетов теплофикационных энергоблоков с учетом способа регулирования отпуска теплоты через зонирование температурного графика.

4. Проведены оптимизационные расчеты и показано, что отклонение параметров (p_0 , t_0 , $t_{п.в}$) от номинальных значений для блоков без промперегрева может составлять 5-10 %. Для блоков с промперегревом отклонение давлений незначительно, а температура острого пара снижается до $\sim 510^\circ\text{C}$ во всех зонах температурного графика. Температура питательной воды, характеризующая систему регенерации, зависит от мощности блока и наличия промперегрева.

5. Показано, что экономия удельного расхода топлива на отпускаемую эксергию при оптимизации параметров теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика может составлять 3-28 % в зависимости от зоны и типа энергоблока.

6. Показана устойчивость оптимальных решений для зоны количественного регулирования температурного графика.

7. Показано, что при создании новых теплофикационных энергоблоков следует учитывать не только их мощность и нагрузки, но и зону температурного графика, в которой планируется их работа, так как от этого фактора зависит структурная схема энергоблока.

8. Показано, что при работе традиционных энергоблоков по зонированному температурному графику и при работе в первой зоне (количественное регулирование) предпочтение следует отдавать ПТ энергоблокам, во второй зоне (смешанное регулирование) работа Т и ПТ энергоблоков равнозначна, а в третьей зоне (качественное регулирование) предпочтение следует отдавать энергоблокам типа Т.

9. Проведен анализ технико-экономических показателей работы Новосибирской ТЭЦ-2 в 2017 году. При этом показано, что при ведении режимов в рассматриваемом году по разработанной методике и с применением представленного в работе программно-вычислительного комплекса эффект экономии топлива составит 15,8 тыс. т у.т./год, что в финансовом выражении составит 19-31 млн. руб. в диапазоне цен на топливо 1200-2000 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:

- *по перечню ВАК:*

1. **Синельников, Д. С.** Устойчивость оптимальных параметров теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков электрических и тепловых нагрузок / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2018. – № 4 (73). – С. 115-127.

2. **Синельников, Д. С.** Повышение коэффициента использования теплоты топлива микро-ТЭС на основе ДВС с воздушным охлаждением за счет когенерации / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. №16-18. – С. 59-68.

- *включенные в Web of Science или Scopus:*

3. **Sinelnikov, D. S.** Methodological specifics of the study of micro HPP based on internal combustion engines with air-cooling and cogeneration / P. A. Shchinnikov, V. G. Tomilov, D. S. Sinelnikov // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 1. – pp. 159-164.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «ТерпОZON» № 2019618448 (РФ). Зарегистрировано 01.07.2019. Приоритет от 19.06.2019. Заявка № 2019617232. **Синельников Д. С., Щинников П. А.**

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ТерпОZON-EQ» № 2019618447 (РФ). Зарегистрировано 01.07.2019. Приоритет от 19.06.2019. Заявка № 2019617230. **Синельников Д. С., Щинников П. А., Григорьева О. К.**

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ТерпОZON-TG» № 2019618499 (РФ). Зарегистрировано 02.07.2019. Приоритет от 19.06.2019. Заявка № 2019617269. **Синельников Д. С., Щинников П. А., Григорьева О. К.**

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ТерпОZON-TS» № 2019617450 (РФ). Зарегистрировано 07.06.2019. Приоритет от 29.05.2019. Заявка № 2019616232. **Синельников Д. С., Щинников П. А., Григорьева О. К.**

Сборники научных трудов и материалы конференций:

8. **Синельников, Д. С.** Оптимизация параметров ТЭС с комбинированной системой теплоснабжения в условиях зонирования температурного графика / Д.С. Синельников // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 300-302.

9. **Синельников, Д. С.** Определение эквивалентной расчетной температуры при зонировании температурного графика / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Международная научно-техническая конференция (г. Ульяновск, 21–22 апреля 2017 г.): сборник научных трудов. Т.1. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 44-48.

10. **Sinelnikov, D. S.** Advantages of the combined heat supply system / D. S. Sinelnikov // *Aspire to Science*: материалы городской научно-практической конференции школьников, студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – С. 182-185.

11. **Синельников, Д.С.** Работа комбинированной системы теплоснабжения в условиях зонирования температурного графика / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Вып.21. – С. 94-104.

12. **Синельников, Д.С.** Обеспечение взаимодействия центрального источника с распределенной генерацией при помощи зонированного температурного графика / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 10 ч.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 266-269.

13. **Синельников, Д. С.** Влияние зонирования температурного графика на теплофикационные энергоблоки графика / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 4. – С. 300–304.

14. **Sinelnikov D.S.** Operation of thermal power station power units at zoning of heat load curve / D. S. Sinelnikov, P. A. Shchinnikov, V. G. Tomilov, O. V. Borush, A. I. Mikhaylenko // *International forum on strategic technology (IFOST 2018)*: proc., China, Harbin, 30 May – 1 June 2018. – Harbin: IEEE, 2018. – pp. 776-779.

15. **Синельников, Д. С.** Особенности загрузки оборудования ТЭЦ с учетом способа регулирования отпуска теплоты / Д.С. Синельников, П.А. Щинников // Повышение энергоэффективности объектов энергетике и систем теплоснабжения: Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. – С. 183-189.

16. **Sinelnikov, D. S.** Influence of the heat load zoning on the CHP parameters based on combined heat supply system / D. S. Sinelnikov // *Aspire to Science*: материалы Международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019 – С. 272-279.

17. **Синельников, Д. С.** Задача оптимизации параметров при отпуске теплоты от ТЭЦ и зонировании температурного графика / Д.С. Синельников // XXXV Сибирский теплофизический семинар: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во Институт теплофизики СО РАН, 2019. – С. 236.

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 1,25 п. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1329 подписано в печать 07.10.2019