

Ф.А. Поливода

---



ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ АВТОНОМНЫЕ  
СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ  
ГОРОДОВ И РЕКОНСТРУКЦИЯ  
ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ



Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Российский университет транспорта (МИИТ)



**Ф.А. ПОЛИВОДА**



**Экологически чистые  
автономные системы  
энергоснабжения городов  
и реконструкция  
тепловых сетей**

Монография

Москва  
2019

УДК 620.91:62-684:662.99

ББК 31.38

П50

**Научный редактор:**

Костин А.В. — к.т.н, доцент кафедры «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта» Института транспортной техники и систем РУТ (МИИТ);

**Рецензенты:**

Минаев Б.Н. — д.т.н., профессор, заведующий кафедрой

«Теплоэнергетика железнодорожного транспорта» РУТ (МИИТ);

Науменко С.Н. — д.т.н., профессор, главный научный сотрудник отдела

«Системы тягового электроснабжения железных дорог» АО «НИИЖТ».

**Поливода Ф. А.** Экологически чистые автономные системы энергоснабжения городов и реконструкция тепловых сетей: Монография. — М.: Издательство «РУТ (МИИТ)» 2019. — 408 с. — ISBN 978-5-600-02298-0.

В книге освещаются теоретические и практические вопросы построения автономны систем энергоснабжения городов, обладающих экологической чистотой. Рассмаи риваются общие вопросы повышения эффективности существующих систем энер госнабжения, создания новой тепловой сети, построенной по бионическому прив ципу, а также методы совершенствования управления тепловой нагрузкой, что по зволит достичь существенной экономии топлива.

Кратко рассмотрены энергосберегающие технологии у потребителей теплоты — уста новки с двигателем Стирлинга и солнечные установки, позволяющие проектировать экономичные здания малой этажности, не потребляющие теплоты от централизо ванной городской системы (немецкая технология «Passiv-Haus»).

Приведён экономический анализ, показывающий выгоду внедрения новой тех нологии энергоснабжения для инвестора. Рассчитана себестоимость производств электроэнергии автономной электрогенерирующей установкой на котельной, на теп ловой сети; внутренней нормы доходности проекта; чисто-дисконтированного доход и других экономических показателей.

Книга предназначена для научных работников, аспирантов, специалистов проектных организаций в области тепловой энергетики.



*Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-18-00009.*

*Работа подготовлена на основе материалов, полученных в ходе исследо ваний по проекту № 16-08-00438.*

*Не подлежит продаже.*

*Воспроизведение в полном объёме или фрагментарно любыми способами материалов (текстов, изображений), опубликованных в настоящем издании, за исключением слу чаев, установленных ГК РФ, допускается только с письменного согласия владельцев исключительных имущественных прав на производство. Все права защищены.*

ISBN 978-5-600-02298-0

© Поливода Ф.А., 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

От автора .....	9
Обозначения и наименования .....	12
Введение .....	17

## ГЛАВА I. ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ РОССИИ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

1.1. Состояние городских теплосетей и источников теплоты .....	21
1.2. Актуальность модернизации городских систем теплоснабжения и рост тарифов на электроэнергию .....	26
1.3. Энергетическая эффективность источников теплоты Центрального федерального округа .....	32
1.4. Проблемы надёжности электроснабжения источника теплоты .....	37
1.5. Распределение тепловых потерь в энергоустановке .....	39

## ГЛАВА II. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕФОРМИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

2.1. Обзор схем существующих централизованных источников энергоснабжения .....	42
2.1.1. Тепловая схема и технология ГТУ .....	42
2.1.2. Модернизация источника энергоснабжения на основе ПГУ как наиболее перспективного направления в крупной энергетике .....	47
2.1.3. Модернизация ТЭЦ .....	51
2.1.4. Модернизация городских квартальных и районных тепловых станций .....	52
2.2. Модернизация тепловых сетей и способы разработки новой теплоизоляции для теплопроводов .....	57
2.2.1. Существующие схемы тепловых сетей .....	59
2.2.2. Методика расчёта функции КПД тепловой сети и визуализация с помощью многомерных поверхностей ..	61

2.2.2.1. Постановка задачи и вывод уравнений для расчёта КПД тепловой сети . . . . .	62
2.2.2.2 Построение двумерной поверхности функции КПД тепловой сети . . . . .	70
2.2.3. Принципы построения бионической теплоизоляции для теплопровода . . . . .	76
2.2.4. Минимизация теплового потока потерь через пористую изоляцию на основе анизотропии функции плотности . . . . .	78
2.2.5. Технология получения бионической теплоизоляции с внутренними мембранами . . . . .	82
2.2.5.1. Технические требования к бионической ППУ-изоляции . . . . .	83
2.2.5.2. Устройство внутренних мембран . . . . .	84
2.2.5.3. Описание технологической установки . . . . .	84
2.2.5.4. Организация работ на технологической установке по нанесению теплоизоляции . . . . .	87
2.2.5.5. Конструкция и принцип работы, технологическая схема машины «Пена-9» по нанесению пенополиуретана . . . . .	89
2.2.5.6. Характеристика основного сырья и вспомогательных материалов, применяемых для изготовления новой ППУ-изоляции для тепловой сети . . . . .	92
2.2.6. Способы автономизации электроснабжения насосно-дрессельной подстанции на основе энергоустановки с ORG-циклом Ренкина . . . . .	96
<b>2.3. Обеспечение резервного электроснабжения водогрейной котельной или РТС. . . . .</b>	<b>100</b>
2.3.1. Возможные схемы электроснабжения котельной . . . . .	100
2.3.2. Электроснабжение котельной на базе установок ГТУ . . . . .	101
2.3.3. Электроснабжение от ДЭС . . . . .	102
2.3.4. Применение новой энергоустановки с ORG-циклом Ренкина для модернизации котельной с котлами типа ДКВР . . . . .	103
<b>2.4. Совершенствование методов управления тепловой нагрузкой . . . . .</b>	<b>107</b>
2.4.1. Существующие методы регулирования . . . . .	107
2.4.1.1. Отопительно-бытовой график . . . . .	108
2.4.1.2. Регулирование по закону изменения отопительной нагрузки . . . . .	112
2.4.1.3. Регулирование по закону совмещённой нагрузки . . . . .	115

2.4.1.4. Годовой $Q$ - $z$ - $t$ график потребления теплоты районом города .....	118
2.4.2. Метод опережающего регулирования тепловой нагрузки ..	122
2.4.2.1. Прогнозирование даты начала отопительного периода и поведение средней температуры в переходное время года .....	122
2.4.2.2. Определение границ изменения влажности воздуха по статистическим данным. ....	124
2.4.2.3. Моделирование зависимости температуры воздуха от его относительной влажности .....	130
2.4.2.4. Прогнозирования даты начала отопительного сезона в зависимости от относительной влажности атмосферного воздуха и количества атмосферных осадков в предыдущий период .....	133
2.4.3. Минимизация затрат на перекачку теплоносителя на основе функции КПД тепловой сети. ....	135
2.4.4. Иерархическая структура системы регулирования тепловой нагрузки городского района .....	143
2.4.4.1. Построение блочной модели оптимального регулирования .....	143
2.4.4.2. Вопросы диспетчеризации и построения автоматизированных систем управления отпуском тепла (АЙСУОТ) .....	148
2.4.4.3. Выбор метода и схемы регулирования .....	151
2.4.4.4. Пиковые регулирующие каталитические котельные в придомовой территории .....	154

### **ГЛАВА III. АВТОНОМНАЯ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА И ЕЁ ВКЛЮЧЕНИЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМУ ГОРОДА**

3.1. Тепловая схема энергоустановки с <b>ORG</b> -циклом Ренкина. ...	157
3.1.1. Энергоустановка с «разомкнутым циклом» .....	157
3.1.2. Энергоустановка с «замкнутым циклом» .....	161
3.2. Органические рабочие тела для применения в энергоустановке. ....	163
3.2.1. Классификация органических рабочих тел .....	165
3.2.2. Рабочие тела на основе аммиака ( $R-717$ ) .....	171
3.2.3. Рабочие тела на основе углеводов .....	173

3.2.4. Диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ )	174
3.2.5. Применение рабочих тел фреонового ряда	176
<b>3.3. Термодинамический анализ цикла Ренкина для РТ фреонового ряда</b>	179
3.3.1. Основные термодинамические формулы	181
3.3.2. Рабочее тело R-11	184
3.3.3. Рабочее тело R-21	187
3.3.4. Рабочее тело R-216-а	190
3.3.5. Анализ результатов термодинамического расчёта.	191
<b>3.4. Эксергетическая диаграмма</b>	193
3.4.1. Диаграмма установки с «открытым» циклом	193
3.4.2. Диаграмма для установки с «закрытым» циклом.	194
<b>3.5. Конструирование агрегатов энергоустановки</b>	195
3.5.1. Расчёт поверхности теплообмена и конструкции парогенератора	196
3.5.2 Унифицированная установка мощностью 750 кВт	199
3.5.3. Расчёт конденсатора по типу жидкость – жидкость	204
3.5.4. Расчёт конденсатора атмосферного типа (жидкость – воздух)	206
<b>3.6. Инфраструктурная связь новой энергоустановки с городской теплосетью.</b>	207
3.6.1. Включение модернизированной РТС в кольцевую конфигурацию тепловой сети города и расчёт на основе матричной модели	207
3.6.2. Обеспечение автономного электропитания для центрального теплового пункта – основа энергетической безопасности теплоснабжения.	216

## **ГЛАВА IV. ПРОБЛЕМЫ КАТАЛИТИЧЕСКОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ КОТЕЛЬНЫЕ**

<b>4.1. Основы теории каталитического горения.</b>	224
4.1.1. Скорость каталитической реакции и режимы горения	225
4.1.2. Энергетическая диаграмма и температурные ограничения процесса горения	231
4.1.3. Гипотеза о магнитной восприимчивости катализаторов – как основа модели катализа.	238
<b>4.2. Водогрейные котлы с «кипящим слоем» сыпучего катализатора.</b>	246

4.2.1 Основные характеристики кипящего слоя .....	247
4.2.2. Проблемы сжигания природного газа в кипящем слое ..	255
4.2.3. Конструирование котлов с кипящим слоем .....	259
<b>4.3 Водогрейные котлы</b>	
<b>со стационарным и зернистым катализатором .....</b>	<b>271</b>
4.3.1. Высокотемпературные пористые материалы .....	272
4.3.2. Каталитический нагревательный элемент (КНЭ).....	275
4.3.3. Селективно- поглощающие методы устройства приемной поверхности .....	277
4.3.4. Экспериментальное исследование характеристик излучающей каталитической пластины ...	280
4.3.5. Двухступенчатое каталитическое окисление топлива ...	283
4.3.6. Методы создания водогрейного котла с пластинчатым металлопористым катализатором .....	285
4.3.7. Экспериментальное исследование модели каталитического водогрейного котла со стационарным пластинчатым катализатором .....	290
<b>4.4 Гидродинамика горения газа и теплообмен на зернистых стационарных катализаторах .....</b>	<b>304</b>
<b>4.5. Методы получения технической воды из конденсата дымовых газов для систем подпитки теплосетей и нужд предприятий .....</b>	<b>309</b>
<b>4.6. Кинетика образования оксидов азота при сжигании топлив .....</b>	<b>315</b>
4.6.1 Равновесная концентрация $\text{NO}_x$ .....	316
4.6.2. Расчёт оптимальной температуры каталитической области .....	319
4.6.3. Экспериментальное исследование зависимости выхода загрязнителей от температуры ...	322
4.6.4. Влияние на выход $\text{NO}_x$ азотосодержащих топлив .....	326
<b>4.7. Проблемы безопасности при конструировании котлов при работе на природном газе .....</b>	<b>329</b>
4.7.1. Условия перехода каталитического горения в факельное .....	330
4.7.2. Скорость распространения фронта открытого пламени ..	334
4.7.3. Конструкции охлаждаемых форсунок – распределителей ТВС .....	337
4.7.4. Пламягасящие фильтры .....	341



## ГЛАВА V. РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ У ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

5.1. Местные солнечные установки для тепло- и энергоснабжения .....	343
5.2. Технология отопления частных домов с помощью двигателя Стирлинга по типу «Passiv-Haus» .....	351
5.3. Типовые технические решения для снижения тепловых потерь у потребителей .....	357
5.3.1. Селективно-отражающие покрытия для минимизации тепловых потерь .....	357
5.3.2. Поквартирный учёт тепловой энергии .....	359
5.3.3. Модернизация ИТП домов на базе комплектных СВ-узлов .....	360
5.3.4. Снижение тепловых потерь в жилых домах .....	363
5.3.5. Мероприятия по пропаганде энергосберегающих технологий и просветительская работа среди населения ..	364

## ГЛАВА VI. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

6.1. Оценка себестоимости и коммерческая привлекательность внедрения электрогенерирующей установки с ORG-циклом Ренкина для тепловой сети и модернизации ЦТП. ....	365
6.2. Оценка эффективности модернизации водогрейной котельной .....	367
6.3. Оценка эффективности двигателя Стирлинга на основе диаграммы Лорентцена .....	380

Заключение. Обобщения и рекомендации для создания экологически чистых высокоэффективных систем энергоснабжения городов .....	384
--	-----

Список литературы .....	396
-------------------------	-----