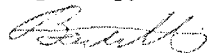


На правах рукописи



МОКРОУСОВ Валерий Сергеевич

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



005059412

16 МАЯ 2013

Владимир - 2013

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и программная инженерия» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир.

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент,
Мельников Владимир Михайлович,
доцент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция
и гидравлика» ВлГУ, г. Владимир.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
Давыдов Алексей Александрович,
заведующий кафедрой «Функциональный
анализ и его приложения», ВлГУ, г. Владимир;

доктор технических наук, доцент,
Потехин Дмитрий Станиславович,
ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная
технологическая академия им. В.А. Дегтярева»,
г. Ковров, Владимирская область.

Ведущая организация **ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»**, г. Москва.

Защита состоится «29» мая 2013 г. в 14 ч 00 мин на заседании
диссертационного совета Д 212.025.01 при ВлГУ по адресу: Россия, г.
Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, аудитория 335-1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ по
адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1.

Автореферат разослан «26» апреля 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ,
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.01.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Н.Н.Давыдов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее десятилетие в России наблюдается ежегодный рост стоимости тепловой энергии, а так же увеличение потерь на всех стадиях: производство, передача и потребление энергоресурсов с 8,51% до 13,1%.

В России, в настоящее время, энергоемкости продукции уделяется мало внимания, полагая, что ее нельзя снизить или если есть возможность уменьшить, то только с помощью больших капитальных вложений, при этом энергетические затраты в промышленности находятся на высоком уровне. Это связано с высоким процентом износа существующего оборудования и несоответствия мощности установленного оборудования заявляемым мощностям, в результате чего наблюдаются большие отклонения фактического потребления по сравнению с нормативными значениями.

Снижение энергопотребления, для возможности конкурирования с иностранными производителями, является одним из важнейших условий современной рыночной экономики. Значительным потенциалом по энергосбережению в нашей стране обладают системы теплоснабжения. Это связано с высокой степенью изношенности генерирующего оборудования, тепловых сетей и ограждающих конструкций зданий.

Для инвестиционной оценки мероприятий по энергосбережению необходима разработка объективных методов многокритериальной оценки энергетической эффективности источников и систем энергоснабжения. Существующие методы анализа потенциала энергосбережения по частным показателям энергоэффективности не дают системных оценок. Требуется совершенствование методов комплексного анализа мероприятий по энергосбережению по различным критериям качества – технологическим, экономическим, потребительским и экологическим.

В соответствии с вышеизложенным, актуальной является проблема многокритериальной оценки мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в системах теплоснабжения промышленных предприятий.

Научной проблемой принятия многокритериальных решений в сложных системах занимались следующие известные ученые: А.В. Костров, В. Купер, О.И. Ларичев, Р.И. Макаров, Т. Саати, А. Чарнес. Разработкой направлений сокращения потерь в системе теплоснабжения занимались О.Л. Данилов, П.И. Левичев, Ю.Г. Назмеев, Б.В. Яковлев. Работы данных ученых рассматривали проблему сокращения потерь как техническую задачу.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с федеральным законом от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», федеральным законом от 27.07.2010 г. №190-ФЗ «О теплоснабжении», постановлением Губернатора Владимирской области от 01.02.2012 № 94 "Об утверждении долгосрочной целевой программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности во Владимирской области на период до 2020 года».

Объектом исследования является система централизованного теплоснабжения промышленного предприятия.

Предметом исследования являются методы принятия многокритериальных решений для выбора направлений повышения энергетической эффективности СТСПП.

Целью работы является повышение энергетической эффективности системы теплоснабжения промышленного предприятия (СТСПП) путем разработки методики многокритериальной оценки мероприятий по оптимизации потребления тепловой энергии.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие **основные задачи**:

1. Проведен анализ методов по расчету потенциала энергосбережения в СТСПП. Сформирован состав критериев и альтернатив, направленных на повышение эффективности СТСПП.

2. Разработана модель описания мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в виде специализированной граф-схемы.

3. Разработана математическая модель оптимизации потребления тепловой энергии в системе теплоснабжения промышленного предприятия.

4. Разработана методика многокритериальной оценки множества мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

5. Проведены экспериментальные исследования по повышению энергетической эффективности ОАО «Владимирский химический завод» и ОАО «Ставропольский завод АТО».

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана специализированная граф-схема для комплексного описания альтернативного и группового выбора мероприятий по энергосбережению в системе теплоснабжения.

2. Предложено и обосновано использование методов многокритериального анализа (МАИ и АСФ) для оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в СТСПП.

3. Разработана математическая модель оптимизации потребления тепловой энергии в СТСПП на основании результатов многокритериальной оценки.

4. Разработана методика оценки направлений повышения энергоэффективности и надежности систем теплоснабжения ОАО «Владимирский химический завод» и ОАО «Ставропольский завод АТО».

Практическая ценность работы определяется следующим:

1. Методика многокритериальной оценки энергетической эффективности СТСПП применяется в практике деятельности ФГУ «Управление по обеспечению энергоэффективности и энергосбережения в Московском регионе» Министерства энергетики РФ.

2. Алгоритм, решающий задачу повышения эффективности вложения денежных средств энергосервисных организаций внедрен в качестве подсистемы информационной системы разрабатываемой ЗАО «Энвижн Груп», при поддержке Европейского банка реконструкции и развития.

3. Решены практические задачи повышения эффективности СТСПП с использованием методики, разработанной в диссертационной работе. По результатам работы, были заменены наиболее изношенные участки паропроводов тепловой сети ОАО «Владимирский химический завод». Годовой экономический эффект от внедрения составляет 994,1 тыс. руб. В результате многокритериального анализа системы теплоснабжения ОАО «Ставропольский завод АТО», на котельной были внедрены мероприятия на сумму 642,291 тыс.руб., экономический эффект за первый год эксплуатации составил 707,223 тыс. руб..

На защиту выносятся:

1. специализированная граф-схема для описания множества мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности СТСПП;

2. математическая модель оптимизации потребления тепловой энергии в системе теплоснабжения промышленного предприятия

3. методика многокритериальной оценки мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности промышленного предприятия;

4. результаты оценки направлений повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на II и III Межрегиональной выставке «Энергоэффективность и технологии энергосбережения. ЖКХ»; Первом Владимирском энергетическом форуме и Международной конференции «Энергосбережение и энергосервис». Получен патент на полезную модель №112410 «Система учета и регулирования потребления тепловой энергии абонентами».

Реализация и внедрение. Результаты работы внедрены на ОАО «Владимирский химический завод», ОАО «Ставропольский завод АТО», МУП о. Муром «Тепловые сети»; используются в практике деятельности ФГУ «Управление по обеспечению энергоэффективности и энергосбережения в Московском регионе» Министерства энергетики РФ и ЗАО «Энвижн Груп».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе три работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и четырех приложений. Основной текст изложен на 156 страницах, содержит 39 рисунка, 27 таблиц. Список литературы включает 119 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследования, решаемые для ее достижения задачи, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Обзор методов системного анализа и тепловых балансов теплоэнергетических систем» дается аналитический обзор применения методологии системного анализа при проведении энергетического обследования теплоэнергетического комплекса промышленного предприятия, рассмотрены методы построения и анализа тепловых балансов предприятия с расчетом потенциала энергосбережения.

Показано, что применение методологии системного анализа при проведении инвестиционного энергоаудита позволяет выявлять причины и сущность протекающих процессов и отбирать обоснованные мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности. Основными направлениями применения системной методологии являются: оценка потенциала энергосбережения тепловой энергии и оптимизация функционирования теплоэнергетических систем.

Обосновано, что СТСПП - многоуровневая система со сложной схемой внутренних и внешних связей, характеризующаяся непрерывностью и неразрывностью во времени процессов производства, распределения и потребления тепловой энергии. Проведен анализ типовых структур СТСПП, состоящих из следующих подсистем: источник энергии, распределительные сети и потребители тепловой энергии. Показано, что каждая подсистема включает в себя определенный набор элементов системы.

Разработана информационная модель энергоменеджмента по оптимизации потерь теплоэнергии на ПП. Определены основные направления сокращения потерь тепловой энергии – замена элементов системы, изменение технологического процесса, схемы тепловой сети, температурного графика, автоматизация работы СТСПП.

Представлена техническая характеристика систем теплоснабжения ОАО «ВХЗ» и ОАО «Ставропольский завод АТО», включающие в себя следующие элементы подсистемы: котельная, паропроводы и трубопроводы горячей воды; система отопления, вентиляции, ГВС и технологические линии предприятий.

Показан метод определения потенциала снижения потребления тепловой энергии по результатам выполнения камерального и инструментального обследования промышленного предприятия. Составлено уравнение общего вида теплового баланса промышленного предприятия.

Для расчета потенциала энергосбережения произведен анализ основных методик вычисления нормативных показателей тепловой энергии на основании действующих нормативно-правовых документов.

Во второй главе «Математические методы, модели и инструментальные средства для многокритериальной оценки

энергетической эффективности» проведена разработка специализированной граф-схемы для комплексного описания выбора мероприятий по энергосбережению и дана постановка задачи оптимизации потерь тепловой энергии на ПП. Дополнительно рассмотрены модели и методы оценки энергетической эффективности СТСПП.

По результатам технико-экономических исследований математических моделей теплоэнергетических объектов, установлено, что одним из главных этапов модернизации оборудования является определение технико-экономических показателей установок, соответствующих требуемым значениям параметров, с учетом технологической схемы объекта и конструкций элементов, применительно к условиям ее эксплуатации.

Для представления перечня мероприятий по энергосбережению в наглядном виде, при поиске актуальных направлений снижения тепловых потерь на объекте, разработана специализированная граф-схема – рисунок 1.

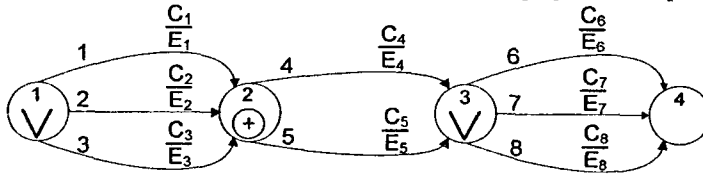


Рисунок 1 - Фрагмент специализированной граф-схемы

Вершинами графа являются характерные точки СТСПП, в которых происходит разделение потока энергии (ЦТП, ИТП, ТК и т.п.). Каждая из дуг графа, представляет техническое или организационное мероприятие, обеспечивающие экономию тепловой энергии на данном участке системы, которое имеет свои затраты - C (стоимость внедрения) и свой эффект - E (количество сэкономленной тепловой энергии в стоимостном выражении).

Дуги 1, 2, 3 соответствуют тем мероприятиям, которые могут быть реализованы на центрально-тепловом пункте предприятия (замена теплообменного оборудования, его теплоизоляция или установка частотно-регулируемых приводов на электродвигатели сетевых насосов).

Дуги 4 и 5 соответствуют тем мероприятиям, которые могут быть выполнены для снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке от ЦТП к ТП (изоляция трубопроводов теплоизоляционными материалами).

Дуги 6, 7, 8 определяют мероприятия по энергосбережению и энергоэффективности в ТП: автоматизация ТП, перевод системы отопления на дежурный режим, регулирование теплоносителя по фасаду здания.

Если на рассматриваемом уровне системы теплоснабжения может быть применено одно или несколько направлений повышения энергетической эффективности из всей совокупности дуг, то указывается символ «V». Для возможности внедрения из всей совокупности только одного мероприятия применяется знак «+». В случае необходимости внедрения всего подмножества мероприятий указывается знак «Λ».

Для изучения фактического состояния системы теплоснабжения и оценки распределения тепловых потоков внутри предприятия составлено уравнение теплового баланса ПП:

$$\Sigma Q_{\text{рт}} = \Sigma_k Q_k^{\text{птр}} + \Sigma Q^{\text{сн}} + \Sigma Q_{\text{пот}_k} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{сн}}} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{пар}}} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{вода}}} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{техн}}} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{от}}} + \Sigma Q_{\text{пот}_{\text{гвс}}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{рт}}$ – располагаемая теплота; $Q_k^{\text{птр}}$ – потребление теплоэнергии k -м потребителем; $Q^{\text{сн}}$ – объем теплоэнергии на собственные нужды котельных или ЦТП; $Q_{\text{пот}_k}$, $Q_{\text{пот}_{\text{сн}}}$, $Q_{\text{пот}_{\text{пар}}}$, $Q_{\text{пот}_{\text{вода}}}$, $Q_{\text{пот}_{\text{техн}}}$, $Q_{\text{пот}_{\text{от}}}$, $Q_{\text{пот}_{\text{гвс}}}$ – потери теплоэнергии котлами; теплотехническим оборудованием котельной; при передаче пара; теплофикационной воды; при технологическом процессе; в системе отопления и вентиляции; в системе ГВС.

В результате анализа уравнения теплового баланса, сделано заключение, что снижение потерь теплоэнергии можно достичь на каждом уровне системы с помощью внедрения энергосберегающих мероприятий.

Сформулирована задача оптимизации потерь теплоэнергии в СТСПП. Для энергосервисной компании мероприятие по энергосбережению оценивается двумя критериями:

- сумма капитальных и эксплуатационных затрат, C ;
- эффект получаемый от внедрения мероприятия, выраженный в стоимостном выражении от объема сэкономленной тепловой энергии, E .

Решение задачи снижения потерь в СТСПП состоит в выборе мероприятий, стоимость которых не превышает запланированного объема, и их внедрение обеспечит получение максимального эффекта.

Пусть D – множество всех мероприятий по энергосбережению, состоящее из трех непересекающихся подмножеств D_1 , D_2 и D_3 .

Подмножество D_1 содержит n мероприятий, которые планируются к внедрению в тепловых пунктах цехов. Подмножество D_2 содержит m мероприятий, которые планируются к внедрению на участке от ЦТП до ИТП цехов. Подмножество D_3 содержит k мероприятий, которые планируются к внедрению на самом верхнем уровне СТСПП (в ЦТП).

Тогда n -мерные вектора $C_1(i)$, $C_2(i)$, $C_3(i)$ и $E_1(i)$, $E_2(i)$, $E_3(i)$ содержат стоимости и эффекты мероприятий из подмножеств D_1 , D_2 и D_3 .

С учетом введенных обозначений задача снижения тепловых потерь в СТСПП решается следующим образом:

1. Составление множества D планируемых мероприятий и декомпозиция его на три непересекающихся подмножества D_1 , D_2 и D_3 в зависимости от места внедрения мероприятий.

2. С помощью МАИ и метода АСФ вначале из подмножеств D_1 , D_2 и D_3 , затем из множества D проводится выбор эффективных мероприятий.

3. Задается значение максимального финансирования (K) направленного на реализацию выбранных мероприятий.

4. Составляется целевая функция, значение которой должно быть максимальным в результате решения задачи следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} D = D_1 \cap D_2 \cap D_3, \\ F(C) = \sum_{i=1}^n E_1(i) + \sum_{i=1}^m E_2(i) + \sum_{i=1}^k E_3(i) \rightarrow \max \\ \sum_{i=1}^n C_1(i) + \sum_{i=1}^m C_2(i) + \sum_{i=1}^k C_3(i) \leq K \end{array} \right. \quad (2)$$

Так как СТСПП является сложной системой, то для учета зависимостей между ее элементами, при выборе мероприятий для подмножеств D_i , разработаны диаграммы причинно-следственных связей.

Для выбора эффективного подмножества мероприятий по энергосбережению на ПП используются методы многокритериального оценивания. Проанализированы следующие методы: min (max) свертка, мультипликативный, МАИ. Достоинством данных методов является сведение многоэкстремальной проблемы к некоторой однокритериальной задаче, целевая функция которой представляет собой свертку исходных локальных критериев. Основным недостатком данных методов является наличие субъективности при определении весовых коэффициентов.

Среди рассмотренных методов был отобран МАИ, который позволяет выявлять несогласованность суждений, и использовать единую шкалу отношений для сравнения качественных показателей.

Для минимизации субъективного фактора при получении интегральных оценок эффективности рассматриваемых мероприятий дополнительно применена методология многокритериального оценивания сравнительной эффективности – Анализ среды функционирования. Она позволяет определять сравнительную эффективность каждого мероприятия по отношению к другим сопоставимым объектам, при этом рассчитывается степень их «удаленности» от эффективных объектов.

Проведен анализ методов экономической оценки инвестиций в энергосберегающие мероприятия. В связи с тем, что во время проведения исследований в основном рассматриваются крупнозатратные мероприятия с длительным сроком окупаемости (5-7 лет), то для расчета экономического эффекта выбран метод дисконтированного срока окупаемости затрат.

В третьей главе «Комплексный анализ и многокритериальная оценка направлений повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения промпредприятия» разработана методика поиска оптимального решения на основании МАИ и метода АСФ.

Для применения МАИ при оценке мероприятий по энергосбережению предлагается использовать трехуровневую иерархию (рисунок 2).

Для ранжирования мероприятий по эффективности использовалась линейная свертка, весовые коэффициенты (вектор приоритетов) которой определялись МАИ. Алгоритм проведения расчетов включает три этапа:

1. Определение степени влияния элементов второго уровня иерархии (критериев) на цель по выбору эффективных мероприятий (1 уровень) в виде нормированного вектора приоритетов критериев W_1 ;

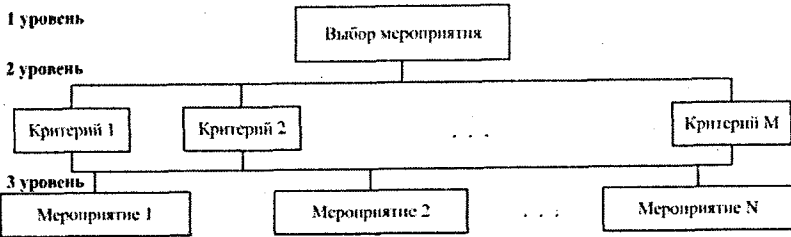


Рисунок 2 - Иерархическая схема оценки энергосберегающих мероприятий

2. Определение относительной важности мероприятий по энергосбережению (альтернатив) с точки зрения рассматриваемых критериев в виде векторов приоритетов альтернатив W_i , $i=2, \dots, N+1$.

Вектор приоритетов альтернатив W_i рассчитывается как правый собственный вектор матрицы парных сравнений $[A]$ из равенства:

$$[A] \cdot W_i = \lambda_{\max} \cdot W_i, \quad (3)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение квадратной матрицы $[A]$.

Сравнение для количественных критериев проводилось на основе фактических измерений и расчетов, для качественных критериев с помощью фундаментальной шкалы абсолютных значений, разработанной Т.Л. Саати.

Если элементы матрицы $[A]$ основаны на субъективных суждениях, то для оценки отклонения использовался индекс согласованности:

$$CR = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (4)$$

где n – порядок квадратной матрицы. Если $CR \leq 0,1$, то суждения считались удовлетворительными.

3. Определение результирующего вектора приоритетов альтернатив согласно следующей формуле:

$$W = [A] \cdot [L] \cdot [W_i] \cdot [B], \quad (5)$$

где $[A]$ – матрица, состоящая из векторов приоритетов альтернатив относительно критериев; $[L]$ – структурная матрица, элементами диагонали которой являются соотношения числа альтернатив над каждым критерием к общему числу альтернатив; $[B]$ – диагональная матрица, для нормирования значений вектора приоритетов альтернатив.

Формирование перечня критериев оценки мероприятий по энергосбережению для ЭСО производилось на основе опроса 28 предприятий, осуществляющих производство и транспортировку теплоэнергии. Перечень содержит следующие частные критерии: экономия тепловой энергии (К1); кап. затраты (К2); эксплуатационные расходы (К3); удобство в эксплуатации (К4); численность персонала (К5); повышение надежности (К6); повышение качества энергетических ресурсов (К7); срок службы оборудования (К8).

Представленные критерии оцениваются на основании экспертизы, как в количественном выражении (снижение потребления энергетических ресурсов), так и по бальной системе (удобство эксплуатации и т.п.).

Базовой моделью для расчета эффективности рассматриваемых мероприятий методом АСФ выбрана модель ССР. Производственными объектами метода АСФ являются мероприятия по энергосбережению и энергоэффективности СТСПП.

Для оценки мероприятий методом АСФ по совокупности частных критериев $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ построена структурная модель (рисунок 3) и составлена задача математического программирования следующего вида:

$$\max_{u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5} h_j = \frac{u_1 \cdot y_{10} + u_2 \cdot y_{20} + u_3 \cdot y_{30} + u_4 \cdot y_{40} + u_5 \cdot y_{50}}{v_1 \cdot x_{10} + v_2 \cdot x_{20} + v_3 \cdot x_{30}}, \quad (6)$$

при ограничениях: $\frac{u_1 \cdot y_{1j} + u_2 \cdot y_{2j} + u_3 \cdot y_{3j} + u_4 \cdot y_{4j} + u_5 \cdot y_{5j}}{v_1 \cdot x_{1j} + v_2 \cdot x_{2j} + v_3 \cdot x_{3j}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, N),$

$$u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 \geq 0.$$

Система соотношений (6) для $j \in \{1, \dots, N\}$ определяет N задач математического программирования. Решая каждую из j -задач для j -го объекта, получаем значение соответствующего показателя эффективности h_j , ранжированное на единичном интервале $[0, 1]$.

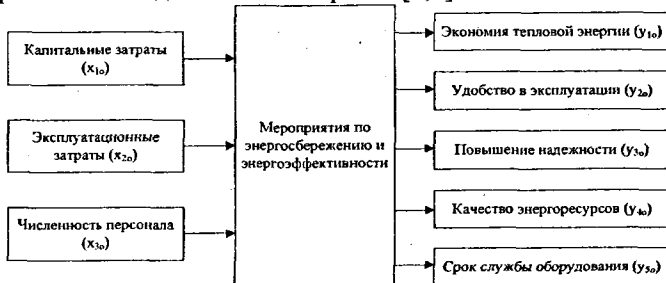


Рисунок 3 - Структурная модель оценки мероприятий по энергосбережению

Сделано заключение, что МАИ и метод АСФ, на основании разработанных моделей, может применяться экспертом при решении задач многокритериального оценивания мероприятий по энергосбережению.

В четвертой главе «Результаты многокритериального оценивания и анализа энергетической эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий» проведен системный анализ и многокритериальная оценка направлений повышения энергоэффективности систем теплоснабжения ОАО «ВХЗ» и ОАО «Ставровский завод АТО».

По результатам камерального энергетического обследования системы теплоснабжения ОАО «ВХЗ» установлено повышенное фактическое потребление теплоты на отопление производственных цехов предприятия (потенциал энергосбережения тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий предприятия составляет: 570,5 Гкал/год).

По результатам замеров установлено, что фактические потери теплоты через теплоизоляцию трубопроводов ОАО «ВХЗ» превышают

нормативные значения в среднем на 40%. Наибольшие отклонения на трубопроводах изолированных минплитой с покровным слоем стеклоткань.

По результатам тепловизионного обследования выявлены тепловые потери через ограждающие конструкции зданий, тепловую изоляцию трубопроводов и поверхности технологического оборудования.

В результате проведенного обследования СТСПП составлен перечень из 18 мероприятий, направленных на повышение эффективности потребления теплотенергии.

Для решения поставленной задачи методом анализа иерархий, расчет весовых коэффициентов критериев и вектор-столбца приоритетов альтернатив относительно главной цели производился в специализированном программном продукте: *Collaborative Decision Making Software*. Результаты расчета представлены на рисунке 4 и 5.



Рисунок 4 - Диаграмма распределения весов критериев иерархии

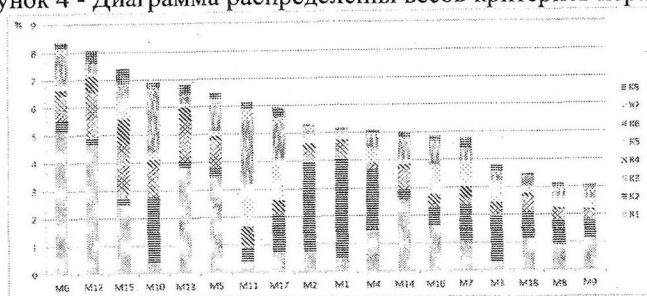


Рисунок 5 - Результат расчета по выбору наилучшей альтернативы относительно главной цели

При анализе данных, представленных на рисунке 5, сделан вывод, что актуальными направлениями для ОАО «ВХЗ» являются мероприятия 6, 12 и 15. Основной эффект от внедрения будет направлен на снижение тепловых потерь при наименьших затратах и повышение надежности.

По результатам выполненных расчетов, математическая модель оптимизации потребления тепловой энергии в системе теплоснабжения ОАО «ВХЗ», с учетом возможности изменения объемов финансовых инвестиций в мероприятия по энергосбережению в пределах заданного «коридора», при ограниченном объеме финансирования записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \text{найти } \max (0,0517x_1 + 0,0535x_2 + 0,0379x_3 + 0,0509x_4 + 0,0649x_5 + 0,0837x_6 + \\
 & + 0,0477x_7 + 0,0313x_8 + 0,0309x_9 + 0,0693x_{10} + 0,0618x_{11} + 0,0806x_{12} + \\
 & + 0,0683x_{13} + 0,0501x_{14} + 0,0741x_{15} + 0,0487x_{16} + 0,0595x_{17} + 0,035x_{18}) / \sum_{i=1}^{18} x_i \\
 & \text{при} \quad \sum_{i=1}^{18} x_i \leq K; \quad \sum_{i=1}^{18} x_{i \min} \leq K \leq \sum_{i=1}^{18} x_{i \max}; \\
 & x_1 = 4; x_2 = 5; 70 \leq x_3 \leq 400; 55 \leq x_4 \leq 300; 825 \leq x_5 \leq 3000; \\
 & 690 \leq x_6 \leq 2500; 450 \leq x_7 \leq 1350; x_8 = 600; x_9 = 680; x_{10} = 2500; \\
 & 1125 \leq x_{11} \leq 2500; 2100 \leq x_{12} \leq 7000; 1340 \leq x_{13} \leq 6500; \\
 & 1420 \leq x_{14} \leq 4500; 750 \leq x_{15} \leq 5500; 300 \leq x_{16} \leq 2000; \\
 & 760 \leq x_{17} \leq 2300; 1120 \leq x_{18} \leq 2500.
 \end{aligned} \right. \quad (7)
 \end{aligned}$$

где $x_1, x_2, \dots, x_{18}$ — объемы денежных средств, выделяемых организацией на реализацию мероприятий по энергосбережению в системе теплоснабжения;

$x_{i \min}$ и $x_{i \max}$ — сумма инвестиций, покрывающая минимально возможные потребности и максимальный объем финансирования.

Адекватность разработанной математической модели (7) подтверждена практическими результатами внедрения мероприятий по энергосбережению на теплоснабжающих организациях Владимирской области. В результате сравнения между плановыми расчетно-нормативными показателями (капитальные и эксплуатационные затраты, объем экономии ТЭР) и фактическими значениями по 28 котельным и 12,459 км. тепловой сети, установлено, что среднеквадратическое отклонение составляет:

- для систем теплоснабжения: затраты: 51 тыс. руб.; экономия: 72 Гкал;

- для систем электроснабжения: затраты: 36 тыс. руб.; экономия: 1,2 кВт·ч.

В качестве базового состава частных критериев оценки и перечня мероприятий методом АСФ используется совокупность характеристик рассмотренных в МАИ. Для оценки мероприятий методом АСФ решена задача нелинейного программирования описанная формулой (6).

Для решения поставленной задачи использовалось специализированное программное обеспечение *Banxia Frontier Analyst*.

Расчет весовых коэффициентов показал, что наибольшее значение на функционал (6) оказывают следующие критерии энергоэффективности: экономия тепловой энергии ($u_1 = 39,57\%$), надежность ($u_3 = 17,87\%$) и капитальные затраты ($v_1 = 14,42\%$) (рисунок 6).

В результате решения $N=18$ оптимизационных задач нелинейного математического программирования (6) получены значения системной энергетической эффективности, представленные на рисунке 7.

По результатам вычислений сделан вывод, что наибольшая сравнительная системная эффективность у мероприятий 1,2,4,5,6,10, 11,12,13,14,15,16,17 ($h = 1$). Глобальные критерии остальных мероприятий меньше единицы ($h < 1$).

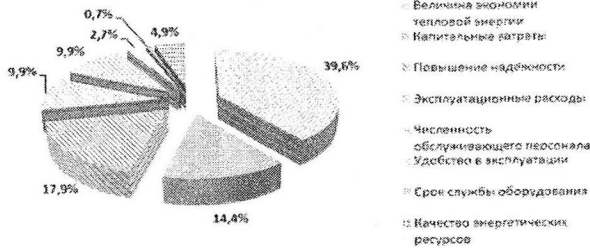


Рисунок 6 - Диаграмма весовых коэффициентов энергоэффективности

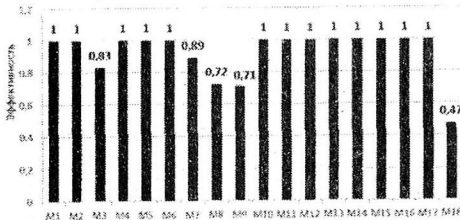


Рисунок 7 - Системная эффективность мероприятий по энергосбережению

По результатам проведенных научных исследований, по многокритериальной оценке направлений повышения эффективности СТСПП, для снижения трудозатрат и повышения качества предлагаемых мероприятий предлагается следующая методика:

- при анализе не более 9 мероприятий по энергосбережению производить вычисления с помощью метода МАИ. Это позволит произвести сортировку всех мероприятий по степени важности для заказчика.
- при рассмотрении мероприятий по энергосбережению в количестве более 10 шт., в зависимости от требований заказчика, предлагается:
- *при экспресс анализе* (для составления энергетического паспорта предприятия) производить многокритериальный анализ только с помощью метода АСФ, для отбора эффективных мероприятий, расположенных на Парето оптимальном множестве;
- *при углубленном анализе* (для составления инвестиционной программы или энергосервисного контракта) на первом этапе производить многокритериальный анализ с помощью метода АСФ для отбора подмножества эффективных мероприятий ($h = 1$). При необходимости, на основании полученных результатов, осуществляется дополнительная оптимизация не эффективных мероприятий ($h < 1$) по отдельным показателям, для возможности приведения их к эффективным.

После отбора подмножества эффективных мероприятий, осуществить вычисления с помощью МАИ для сортировки мероприятий по степени важности для заказчика, с учетом весовых коэффициентов частных критериев, дополнительно согласованных с заказчиком.

Выполнение данного метода, при углубленном анализе, позволяет исполнителю снизить свои трудозатраты, с помощью отсеивания неэффективных мероприятий на первом этапе, а также повысить качество

предоставляемых направлений по энергосбережению заказчику, с помощью ранжирования их по эффективности относительно главной цели.

Приведены результаты расчетов (таблица 1) при фиксированном объеме финансовых инвестиций направленных на реализацию мероприятий по энергосбережению. Зависимость экономического эффекта (E) от объема капиталовложений ($З$) и отношение $E/З$ (значение получаемого эффекта на рубль капитальных и эксплуатационных затрат) представлен на рисунке 8.

Таблица 1 – Результаты расчетов оптимальных наборов мероприятий

Стоимость, тыс. руб.	Экономический эффект, тыс. руб./год	$E/З$	Номер мероприятия по энергосбережению
8889	36747,54	4,13	1, 2, 6, 15
12015	46868,04	3,90	1, 2, 5, 6, 15
13789	46186,56	3,35	1, 2, 4, 12, 15
14825	53483	3,61	1, 2, 4, 5, 6, 15, 17
16129	57271,54	3,55	1, 2, 6, 12, 15
19555	67802,91	3,47	1, 2, 4, 5, 6, 12, 15
22065	74007,36	3,35	1, 2, 4, 5, 6, 12, 15, 17
24555	78560,46	3,20	1, 2, 4, 5, 6, 12, 15, 16, 17

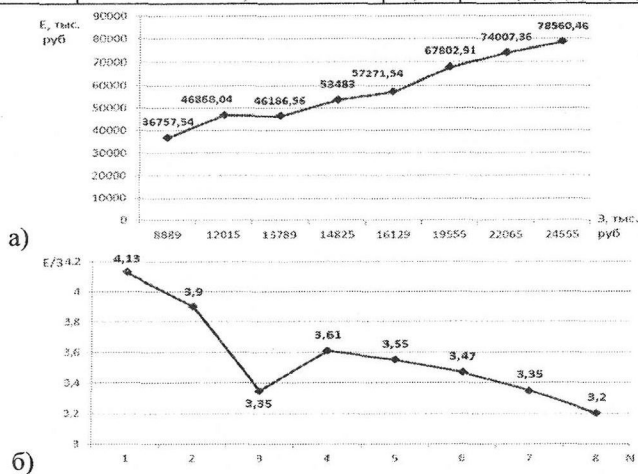


Рисунок 8 - а) Зависимость $E/З$; б) Зависимость $E/З(N)$

Данный анализ, рекомендуется применять при использовании метода АСФ, что позволит исполнителю по результатам многокритериальной оценки мероприятий распределять выделенные средства с наибольшей экономической эффективностью среди эффективных мероприятий.

При многокритериальной оценке мероприятий МАИ и в случае возможности изменения объемов финансовых инвестиций в пределах заданного «коридора» оптимальное распределение денежных ресурсов определяется в результате решения задачи (7) – рисунок 9.

По результатам анализа полученных данных (рисунок 9) сделан вывод, что на рассматриваемом диапазоне инвестиционных вложений существует только одна точка глобального максимума (27000 тыс. руб.).

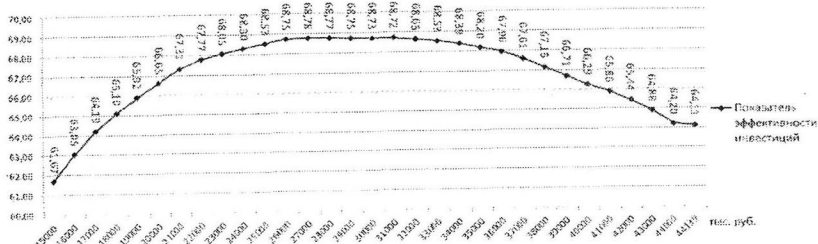


Рисунок 9 - Зависимость значений показателя эффективности от объема инвестиционных вложений

На основании разработанной методики многокритериальной оценки произведен анализ направлений повышения эффективности котельной ОАО «Ставропольский завод АТО». По результатам проведенного энергетического обследования разработано 9 мероприятий по энергосбережению.

В качестве базового множества частных показателей оценки мероприятий принята совокупность критериев рассмотренных для ОАО «ВХЗ». Основной интерес руководства предприятия направлен на снижение потребления энергетических ресурсов при допустимом объеме капитальных и эксплуатационных затрат и снижение численности персонала.

В результате решения $N=9$ оптимизационных задач нелинейного математического программирования (6) методом АСФ сделан вывод, что все рассматриваемые мероприятия ($M1 \div M9$) являются эффективными ($h = 1$).

Для ранжирования рассматриваемого множества мероприятий по степени важности для заказчика применялся МАИ. По результатам вычислений сделан вывод, что наиболее актуальными направлениями для объекта исследования являются: замена ламп накаливания на светодиодные фонари; замена сетевого насоса; установка частотно-регулируемых приводов на электродвигатели дымососа и вентилятора котла.

В **заключении** изложены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В **приложениях** приведены диаграммы причинно-следственных связей мероприятий по энергосбережению; расчет фактических показателей тепловых потерь через изоляцию трубопроводов; результаты расчета эффективности финансовых инвестиций в реализацию проекта; акты внедрения и использования результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана специализированная граф-схема для комплексного описания альтернативного и группового выбора мероприятий по энергосбережению в системе теплоснабжения.

2. Предложено и обосновано использование методов многокритериального анализа для оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в СТСПП.

3. Разработана математическая модель оптимизации потребления тепловой энергии в СТСПП на основании результатов многокритериальной оценки.

4. Разработана методика повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения ОАО «ВХЗ» и ОАО «Ставропольский завод АТО».

5. Решены практические задачи с применением методики, разработанной в диссертационной работе.

По результатам работы, были заменены наиболее изношенные участки паропроводов ОАО «ВХЗ». Годовой экономический эффект от внедрения составляет 994,1 тыс. руб. В результате многокритериального анализа системы теплоснабжения ОАО «Ставропольский завод АТО», на котельной были внедрены мероприятия на сумму 642,291 тыс.руб., экономический эффект за год эксплуатации составил 707,223 тыс. руб.

Полученные научные результаты применены в практике деятельности ФГУ «МОСРЕГИОНЭНЕРГО», при разработке методических рекомендаций по составлению инвестиционных программ и энергосервисных контрактов для промышленных предприятий и внедрены в качестве подсистемы информационной системы разрабатываемой ЗАО «Энвижн Груп», при поддержке Европейского банка реконструкции и развития.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Мокроусов, В.С. Применение специализированной граф-схемы для описания вариантов энергосберегающих мероприятий/ В.С. Мокроусов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново: 2012 - №5, - С. 85-87 (лично автором – 100%).

2. Мокроусов, В.С. Способы многокритериального оценивания направлений повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения/ В.С. Мокроусов // Известия Юго-Западного государственного университета. – Курск: 2012 - №2, - С. 334-339 (лично автором – 100%).

3. Мокроусов, В.С. Результаты многокритериального оценивания мероприятий по энергосбережению при проведении энергетического обследования промпредприятия/ В.С. Мокроусов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – Воронеж: 2012 - №2, - С.117-123 (лично автором – 100%).

Публикации в научных журналах и изданиях

4. Мокроусов, В.С. Обработка экспертных оценок для построения весовых функций мероприятий по энергосбережению/ В.М. Мельников, В.С. Мокроусов // Научные аспекты инновационных исследований. Том I. – Самара: ООО «Инсома-пресс». 2013. – С. 35-38 (лично автором – 50%).

5. Мокроусов, В.С. Методы экономической оценки инвестиций в энергосберегающие мероприятия/ Мельников В.М., Мокроусов В.С.//

Научный журнал «Апробация» №2. – М.: Издательство Перо. 2013. – С. 9-10 (лично автором – 60%)

6. Мокроусов, В.С. Применение сенсорных сетей в теплоэнергетике/ В.М. Мельников, В.С. Мокроусов // Социально-экономические системы: особенности развития, функционирования и управления в условиях инновационной направленности – Владимир. 2010. – С. 212-216 (лично автором – 75%).

7. Мокроусов, В.С. Особенности анализа структуры системы теплоснабжения промышленного предприятия/ В.С. Мокроусов // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов IX Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Издательство НГТУ. 2012. – С. 17-20 (лично автором – 100%).

8. Мокроусов, В.С. Анализ теплового баланса предприятия химической промышленности/ В.С. Мокроусов // Научная дискуссия: инновации в современном мире: Материалы V международной заочной научно-практической конференции – М.: Изд. «Международный центр науки и образования». 2012. – С. 47-51 (лично автором – 100%).

9. Мокроусов, В.С. Математическая модель оптимизации тепловой энергии системы теплоснабжения/ В.С. Мокроусов // Инновации в науке: материалы XII международной заочно-практической конференции. Часть I. – Новосибирск: Издательство «Сибирская ассоциация консультантов». 2012. – С. 67-73 (лично автором – 100%).

10. Мокроусов, В.С. Критерии эффективности систем теплоснабжения/ В.С. Мокроусов // Технические науки – от теории к практике: материалы XII международной заочно-практической конференции - Новосибирск: Издательство «Сибирская ассоциация консультантов». 2012. – С. 55-60 (лично автором – 100%).

11. Мокроусов, В.С. Применение методологии системного анализа при проведении энергетического обследования промышленного предприятия/ В.С. Мокроусов // Технические науки – основа современной инновационной системы: I Международная науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола: Коллоквиум. 2012. – С. 9-10 (лично автором – 100%).

12. Мокроусов, В.С. Организация учета теплоэнергии как подготовительная стадия энергоаудита промышленного предприятия/ В.С. Мокроусов, В.М. Мельников // Материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции «Тичуринские чтения». Т.2 – Казань: КГТУ. 2012. – С. 125-126 (лично автором – 65%).

Подписано в печать 23.04.13.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 120 экз.

Заказ 90

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.