

# Многокритериальная оптимизация режимов работы котельного отделения электростанции

Студент: Кузьмин Артем Юрьевич

Руководитель: Романова Татьяна Николаевна

# Цель и задачи работы

**Цель работы** – разработка метода многокритериальной оптимизации режимов работы котельного отделения электростанции и его исследование на примере котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго .

## **Решаемые задачи:**

1. Анализ существующих оптимизационных продуктов и решений;
2. Анализ существующих алгоритмов оптимизации и выбор одного из них для реализации;
3. Выделение параметров и ограничений, необходимых для построения математической модели;
4. Формулирование используемых критериев оптимизации;
5. Формулирование целевой функции многокритериальной оптимизации;
6. Построение математической модели;
7. Разработка метода многокритериальной оптимизации;
8. Разработка программного продукта на основе данного метода;
9. Исследование разработанного метода и сравнение полученных результатов с другими известными результатами

# Существующие продукты и решения

<p><b>«СМиОР»</b> – система моделирования и оптимизации режимов работы. (ЗАО «Крок инкорпорейтед», 2012).</p> <p>Основной бизнес-процесс – <b>«I4Plan»</b>.</p> <p>Используемые продукты – IBM ILOG (CPLEX, JVIEWS), Thermoflex.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Использование имитационного моделирования;</li> <li>• Мощные математический и визуализационный модули;</li> <li>• Возможность расчета и сравнения нескольких сценариев.</li> </ul>	<p><b>ПК для оптимизации режимов работы тепловых электростанций.</b></p> <p>(Иванов Н.С., Беспалов В.И., Лопатин Н.С. – «Известия Томского политехнического университета, 2008).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Возможность «динамической» оптимизации и оптимизации на заданном оборудовании;</li> <li>• Использование БД для хранения информации;</li> <li>• Наличие ручного модуля распределения нагрузок персоналом.</li> </ul>	<p><b>ПК «ТЭС-Эксперт»</b> – оптимальное ведение режима работы теплоэлектроцентрали. (Борисов А.А. – «Вестник ИГЭУ», 2008).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оптимизация режимов работы как котлоагрегатов, так и турбоагрегатов;</li> <li>• Возможность планирования затрат тепла и электроэнергии.</li> </ul>
--	---	---

**Во всех рассмотренных продуктах – отсутствие возможности оптимизации по нескольким критериям, учета информации о коэффициентах относительной важности критериев.**

# Алгоритмы оптимизации

<b>Адаптивный алгоритм случайного поиска с переменным шагом.</b>	<b>Комбинаторный эвристический алгоритм.</b>	<b>Прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Эффективен на начальной стадии вычислений для задач, содержащих не более 10 переменных;</li> <li>• Для получения решения с большей точностью скорость сходимости алгоритма недостаточна;</li> <li>• Целесообразно использовать как вспомогательный прием для определения «хорошей» начальной точки при применении более сложных методов оптимизации.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Более эффективный, чем алгоритм случайного поиска, - минимизирует обращение к выборкам;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Более эффективный, чем адаптивный или комбинаторный алгоритмы;</li> <li>• Наиболее эффективен для решения многоэкстремальных задач.</li> </ul>

**Был выбран метод прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска, остальные методы направлены, в основном, на поиска локального экстремума функции.**

# Постановка задачи

*Задача оптимизации состоит в нахождении:*

- оптимального состава очереди котлоагрегатов,
- паровых нагрузок для каждого из котлов,
- топлива, используемого каждым из котлов.

*В качестве критериев оптимизации режимов работы котлоагрегатов выделим:*

- расход газа -> **min**,
- расход жидкого топлива (мазута) -> **min**,
- финансовые затраты на используемое топливо -> **min**,
- коэффициент полезного действия (КПД) очереди котлоагрегатов -> **max**.

# Ограничения

## 1. Диапазоны рабочей производительности для каждого из котлоагрегатов

$$D_{Ki}^{min} \leq D_{Ki} \leq D_{Ki}^{max}, \quad i = 1 \dots (n + m)$$

Где  $D_{Ki}^{min}$  – минимально возможная паропроизводительность  $i$ -го котлоагрегата;  
 $D_{Ki}^{max}$  – максимально возможная паропроизводительность  $i$ -го котлоагрегата;  $D_{Ki}$  – текущая паропроизводительность  $i$ -го котлоагрегата.

## 2. Суммарная паропроизводительность группы котлоагрегатов

$$\sum_{i=1}^{n+m} D_{Ki} = D_k$$

Где  $D_{Ki}$  – паропроизводительность  $i$ -го котлоагрегата;  $D_k$  – суммарная паропроизводительность группы работающих котлоагрегатов.

# Математическая постановка задачи ОПТИМИЗАЦИИ

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{K1:} \ B^{\Gamma}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^n B_i^{\Gamma}(D_{Ki}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K2:} \ B^{\mathbf{M}}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^m B_i^{\mathbf{M}}(D_{Ki}) \rightarrow \min; \\ \mathbf{K3:} \ F_{\mathbf{M}+\Gamma}(\{D_k\}) = \sum_{i=1}^n B_{\Gamma i}(D_{Ki}) * p_{\Gamma} + \sum_{i=1}^m B_{\Gamma i}(D_{Ki}) * p_{\mathbf{M}} \rightarrow \min; \\ \mathbf{K4:} \ \eta_K = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) * Q_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) + \sum_{j=1}^m \eta_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj}) * Q_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj})}{\sum_{i=1}^n Q_{Ki\Gamma}(D_{Ki}) + \sum_{j=1}^m Q_{Kj\mathbf{M}}(D_{Kj})} \rightarrow \max; \end{array} \right.$$

где  $B_i^{\Gamma}(D_{Ki})$  – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности  $D_{Ki}$   $i$ -ым парогенератором;  
 $B_i^{\mathbf{M}}(D_{Ki})$  – расход мазута для обеспечения текущей паропроизводительности  $D_{Ki}$   $i$ -ым парогенератором;  
 $p_{\mathbf{M}}$  – цена на мазут;  $p_{\Gamma}$  – цена на газ;  
 $\eta_{Ki}(D_{Ki})$  – КПД полезного действия  $i$ -го котлоагрегата;  
 $\{D_k\} = \{D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{kn}\}$  – вектор паропроизводительностей  $n$  котлоагрегатов.

Целевая функция:  $\mathbf{F} = \mathbf{K1} + \mathbf{K2} + \mathbf{K3} - \mathbf{K4} \rightarrow \min;$

# Метод многокритериальной ОПТИМИЗАЦИИ

*Разработанный метод состоит из двух шагов:*

- формирование множества возможных векторных критериев;
- выбор наилучшего векторного критерия из множества возможных.



# Формирование множества ВОЗМОЖНЫХ векторных критериев

*Каждый из  $n$  котлоагрегатов может находиться в одном из состояний:*

- Выключен;
- Работает на газе;
- Работает на мазуте;

**Всего таких комбинаций  $3^n$ .**

Для каждой из комбинаций проверяется, может ли она обеспечить выполнение заданной суммарной паропроизводительности:

$$\sum_{i=1}^m D_{Ki}^{min} \leq D_k \leq \sum_{i=1}^m D_{Ki}^{max},$$

где  $m$  – количество работающих котлов в данной комбинации.

# Формирование множества ВОЗМОЖНЫХ векторных критериев

- В случае удовлетворения комбинации заданному ограничению – проведение «локальной» оптимизации.
- В противном случае комбинация не рассматривается.
- Сохранение вектора  $f_i = \left( B^r(\{D_k\})_i, B^m(\{D_k\})_i, F_{m+r}(\{D_k\})_i, \eta_{K_i} \right)$ , состоящего из значений выделенных критериев, полученных в результате многокритериальной оптимизации, проведенной для текущей комбинации.

# «Локальная» оптимизация

Оптимизация с помощью метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска.

$D_K$  – суммарная паропроизводительность, которую должна обеспечивать очередь котлоагрегатов.

Необходимо определить  $n-1$  переменных  $D_{Ki}$ , где  $n$  – количество котлоагрегатов в очереди. Переменная  $D_{Kn}$  определяется из соотношения:

$$D_{Kn} = D_K - \sum_{i=1}^{n-1} D_{Ki}.$$

# Выбор начальных решений

Выбор начальных решений, входящий в состав метода прямых выборочных процедур:

$$x_i^0 = \frac{x_i + \bar{x}_i}{2}, i = 1, \dots, n.$$

Для решения поставленной задачи такой выбор начальных решений **не подходит**.

Необходимо разработать **иной** алгоритм выбора начальных решений.

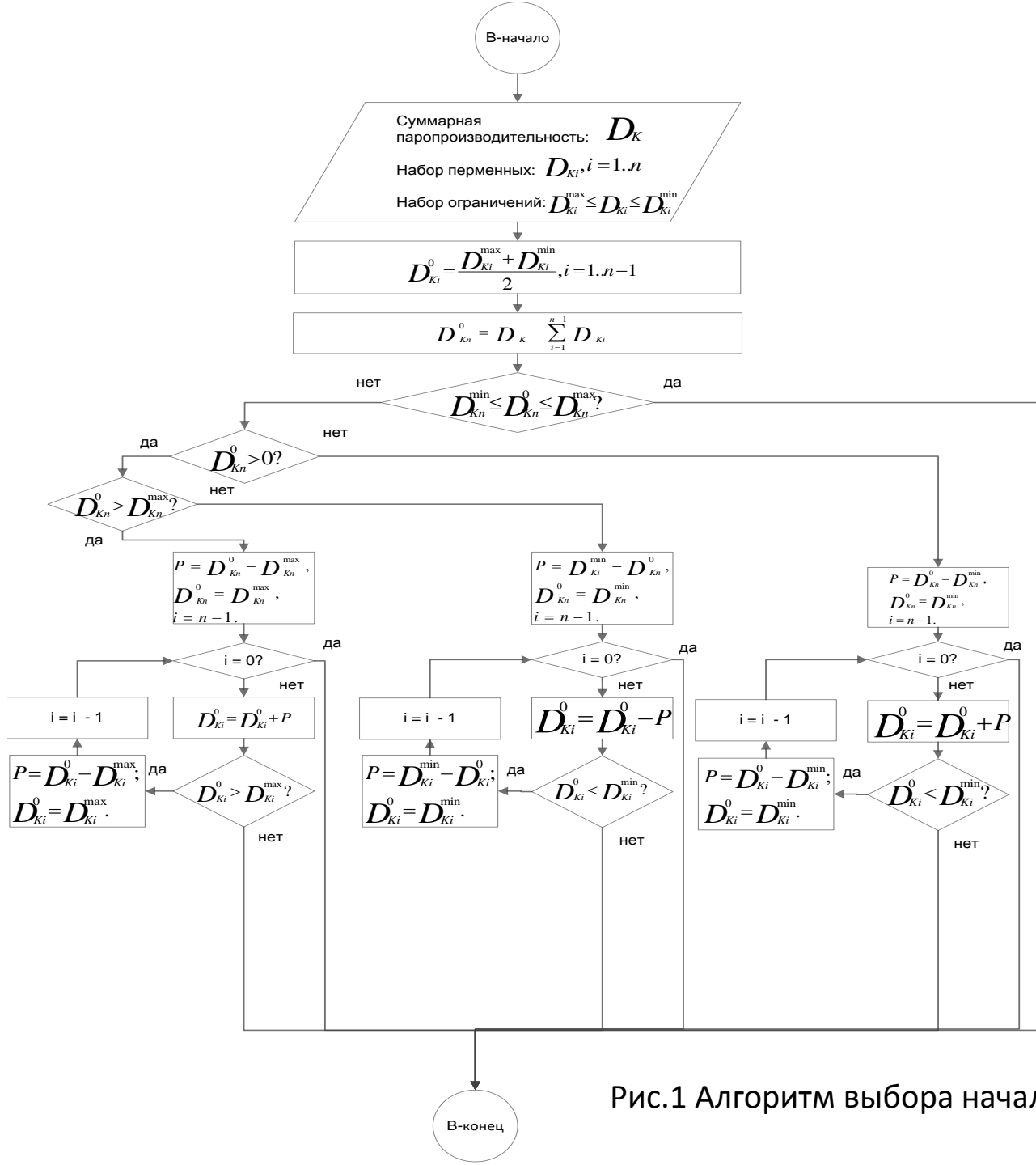


Рис.1 Алгоритм выбора начальных решений 13

# Формирование множества ВОЗМОЖНЫХ векторных критериев

После расчета всех комбинаций, получим множество возможных решений:

$$U = \begin{cases} f_1 = \left( B^\Gamma(\{D_k\})_1, B^M(\{D_k\})_1, F_{M+\Gamma}(\{Dk\})_1, \eta_{K_1} \right) \\ f_2 = \left( B^\Gamma(\{D_k\})_2, B^M(\{D_k\})_2, F_{M+\Gamma}(\{Dk\})_2, \eta_{K_2} \right) \\ \dots \\ f_n = \left( B^\Gamma(\{D_k\})_n, B^M(\{D_k\})_n, F_{M+\Gamma}(\{Dk\})_n, \eta_{K_n} \right) \end{cases}$$

# Выбор наилучшего векторного критерия

Выбор наиболее подходящего векторного критерия из множества состоит из трех этапов:

- построение множества Парето;
- сужение множества Парето на основе информации о коэффициентах относительной важности критериев;
- применение метода целевого программирования для выбора оптимального векторного критерия.

# Сужение множества Парето

Коэффициенты относительной важности критериев:

$$\theta_{ij} = \frac{w_j^*}{w_i^* + w_j^*}, \quad (0 < \theta_{ij} < 1).$$

Менее важный  $j$ -й критерий в общем списке критериев  $f_1, f_2, \dots, f_m$  необходимо заменить новым, вычисленным по формуле:

$$\theta_{ij}f_i + (1 - \theta_{ij})f_j.$$

Где  $w_j^*$  - количество единиц по менее важному критерию,  $w_i^*$  - количество единиц по более важному критерию

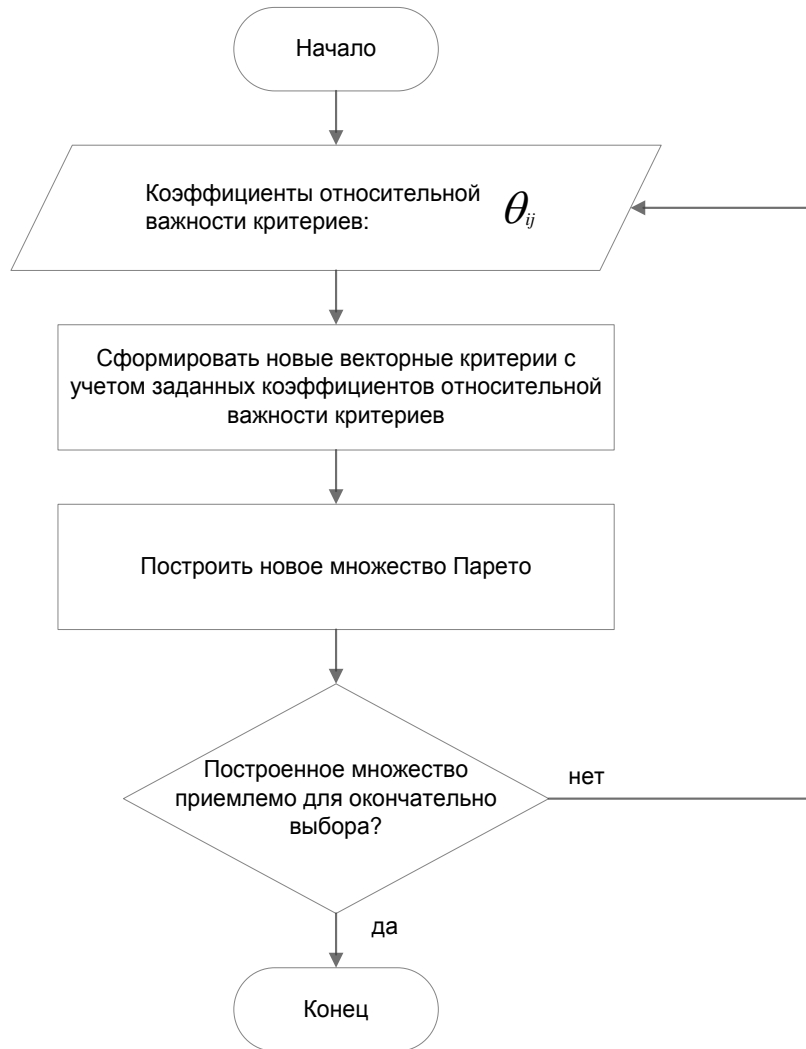


Рис.2 Алгоритм сужения множества Парето



# Метод целевого программирования

В пространстве  $R^m$  задан вектор  $y$ , который называют идеальным вектором.

Задается метрика – числовая функция  $\rho = \rho(y, z)$ , которая каждой паре векторов  $y, z$  сопоставляет неотрицательное число, называемое расстоянием между векторами  $y$  и  $z$ .

Оптимальным объявляется такое решение  $x^* \in X$ , для которого выполняется равенство :

$$\inf_{y \in U} \rho(f(x^*), y) = \min_{x \in X} \left( \inf_{y \in U} \rho(f(x), y) \right).$$
$$\rho(y, K_4) = \sum_{i=1}^4 (y_i - f_i(x^*))^2.$$

# Исследование

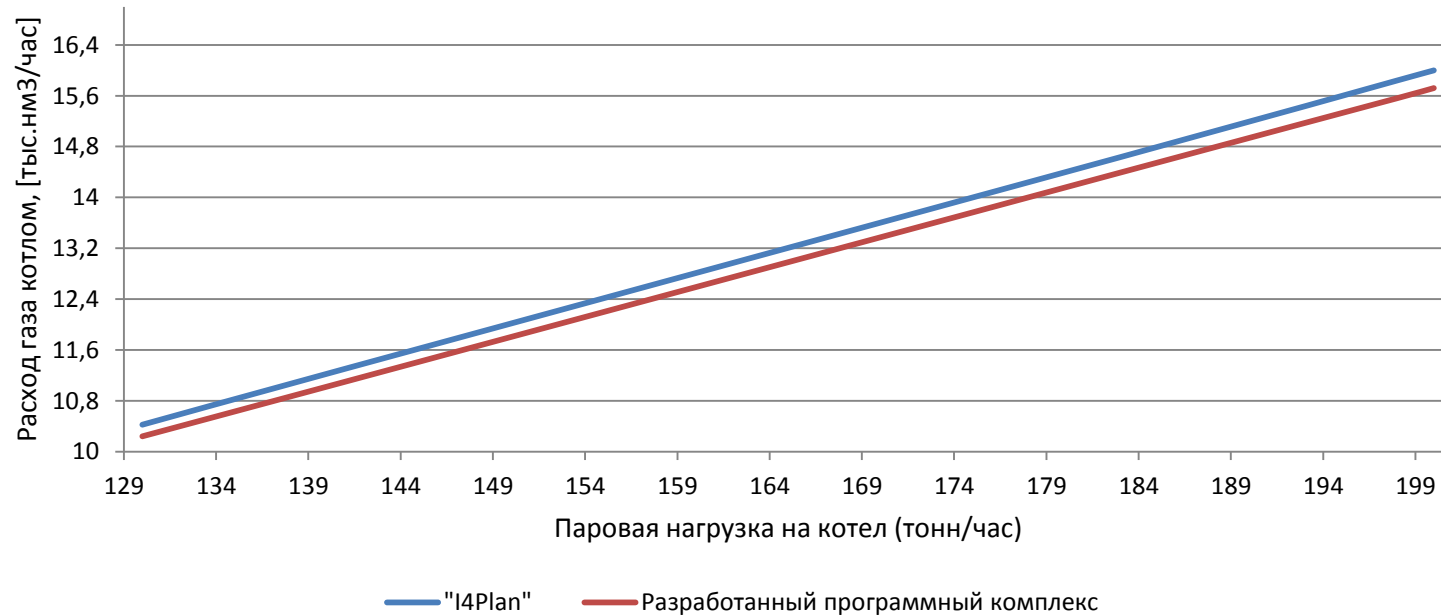


Рис. 3. Зависимости расхода газа котлом «K4» от паровой нагрузки.

**Средний процент расхождения: 1.7%**

# Исследование

Дисперсионный анализ – исследование значимости различий в средних значениях.



Рис.4. Схема сравнения средних

# Исследование

**U-критерий Манна–Уитни:**

$$U = n_1 * n_2 + \frac{n_x * (n_x + 1)}{2} - T_x.$$

Таблица 3. Расчет рангов для сравниваемых выборок

№	Расход газа («I4Plan»), [тыс.нм³/час]	Ранг «I4Plan»	Расход газа (разработанный программный продукт), [тыс.нм³/час]	Ранг значений разработанного программного продукта
1	10,42	2	10,24	1
2	11,31	4	11,1	3
3	14,63	6	14,39	5
4	15,83	9	15,56	7
5	15,99	10	15,72	8
Сумма рангов		<b>31</b>		<b>24</b>

$T_x = 31$ . Тогда  $U = 9$ .

$U_{кр} = 5$ .

$$U > U_{кр}$$

# Исследование

Рассмотрены ситуации:

- **«Приоритет расхода топлива»**
  - Все критерии оптимизации имеют одинаковый вес;
  - Известны цена на газ и мазут на рынке электроэнергии;
  - Задана плановая паропроизводительность, которую должна обеспечивать очередь котлоагрегатов.
- **«Приоритет одного вида топлива»**
  - Критерий расхода газа важнее остальных критериев;
  - Коэффициенты относительной важности задаются с помощью экспертного блока;
  - Известны цены на газ и мазут на рынке электроэнергии;
  - Задана плановая паропроизводительность, которую должна обеспечивать очередь котлоагрегатов.

# Исследование

Ситуация – «Приоритет расхода топлива».

Таблица 4. Сравнение режимов работы для ситуации «Приоритет расхода топлива»

Котлоагрегат	Режим работы («I4Plan»)		Режим работы (разработанное ПО)	
	Состояние	Паровая нагрузка, [тонн/час]	Состояние	Паровая нагрузка, [тонн/час]
K1	Выкл.	0	Выкл.	0
K2	Выкл.	0	Выкл.	0
K3	Выкл.	0	Выкл.	0
K4	Газ	220	Газ	218
K5	Газ	219	Газ	209
K6	Газ	219	Газ	211
<b>Расход газа, [тыс.нм³/час]</b>	50,051		<b>50,043</b>	
<b>Расход мазута, [тонн/час]</b>	0		0	
<b>Финансовые затраты на топливо, [руб./час]</b>	174278,66		<b>174249,73</b>	
<b>КПД группы котлоагрегатов, [%]</b>	93,78		<b>93,803</b>	

# Исследование

Ситуация –  
«Приоритет одного вида топлива».

- Плановая паропроизводительность: **638 тонн/час**;
- Газ: **3482 руб./тыс.нм3**
- Мазут: **6500 руб./т.**
- Коэффициенты относительной важности: **[10%; 90%]**

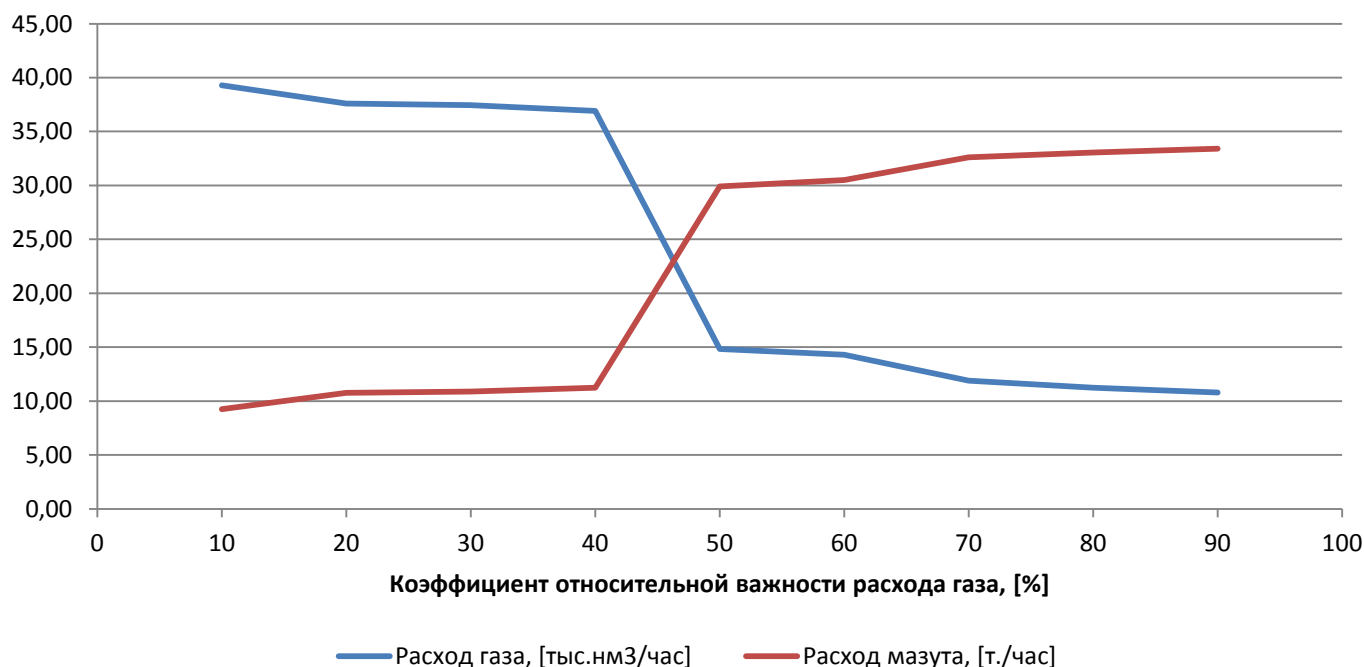


Рис. 5. Зависимость значения критериев расхода топлива от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

# Исследование

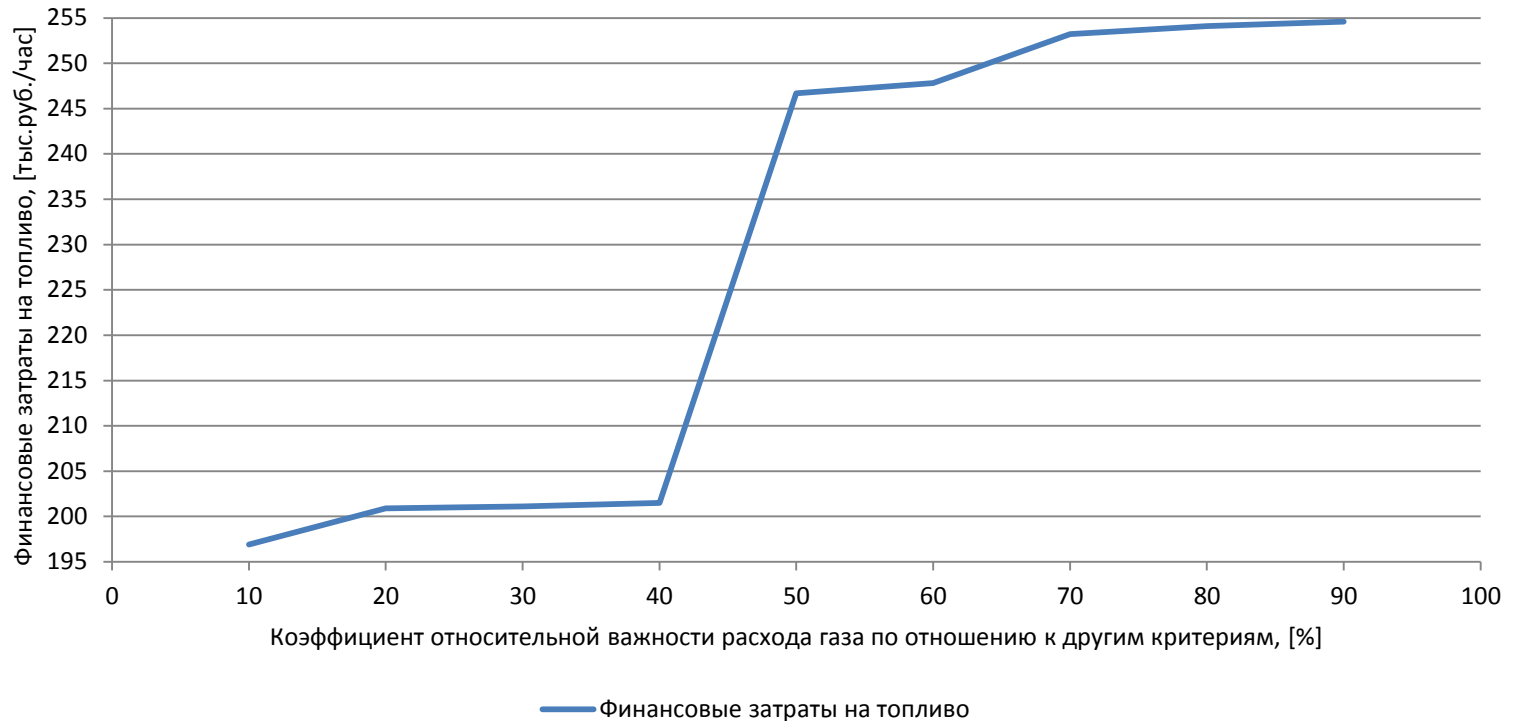


Рис. 6. Зависимость финансовых затрат на топливо от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.



# Исследование

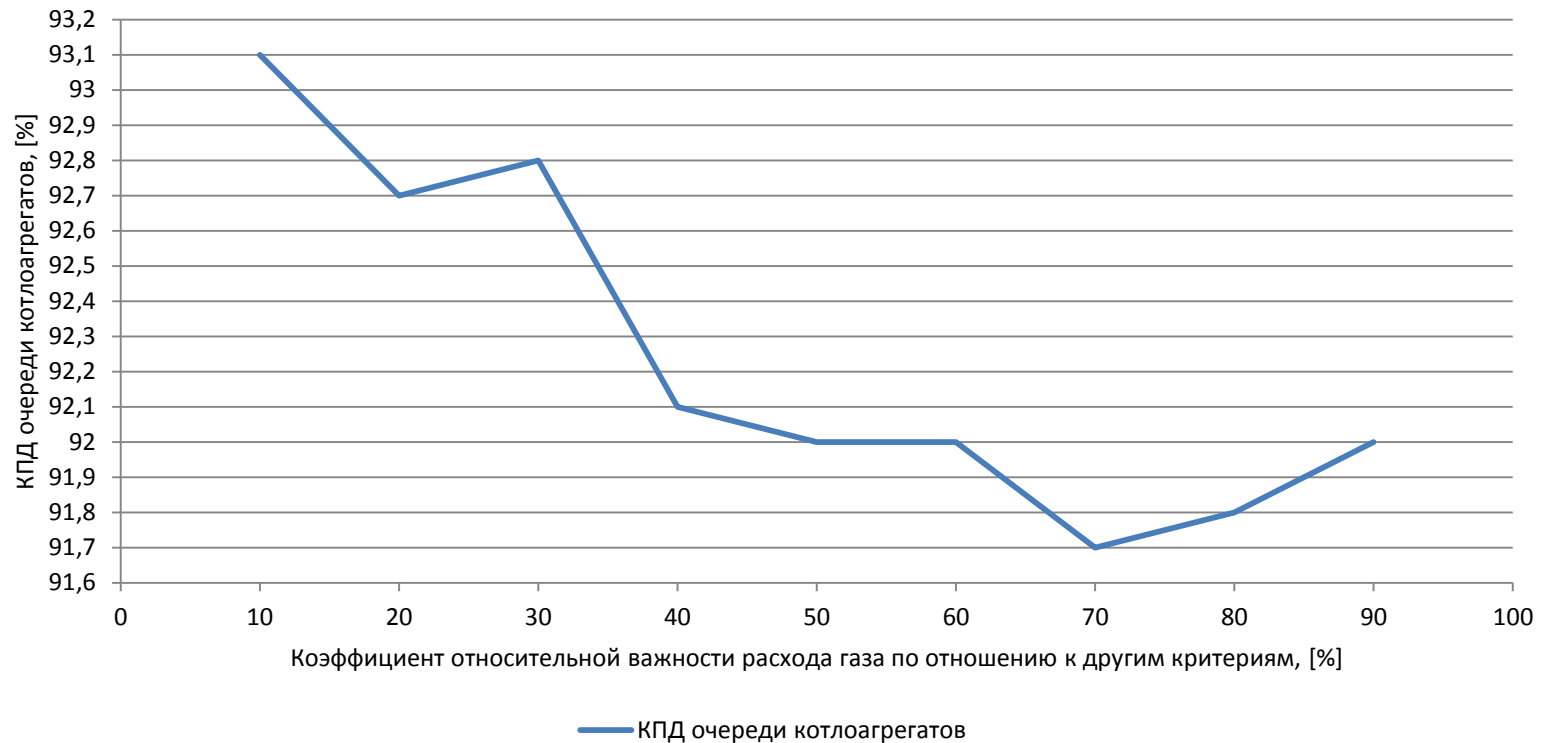


Рис. 7. Зависимость значения критерия КПД очереди котлоагрегатов от коэффициента относительной важности расхода газа по отношению к другим критериям.

# Заключение

## В результате работы:

1. Проведен анализ существующих оптимизационных продуктов и решений;
2. Проведен анализ существующих алгоритмов оптимизации и выбран один из них;
3. Выделены параметры и ограничения, необходимые для построения математической модели;
4. Сформулированы критерии оптимизации;
5. Сформулирована целевая функция многокритериальной оптимизации;
6. Построена математическая модель;
7. Разработан метод многокритериальной оптимизации;
8. Разработан программный комплекс, реализующий данный метод;
9. Проведено исследование разработанного метода и сравнение полученных результатов с другими известными результатами.