# Конструкторский раздел

В данном разделе приводится состав котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, описывается базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегатами. Приводится модификация математической модели в соответствии с требованиями поставленной задачи и конкретными параметрами, относящимися к условиям функционирования ТЭЦ-20 Мосэнерго. Выполняется построение целевых функций для сформулированных в п.1 критериев оптимизации, а также построение общей целевой функции, описывающей поставленную многокритериальную оптимизационную задачу.

Приводится описание метода, предлагаемого для решения поставленной задачи, а также алгоритма, реализующего данный метод.

Описывается структура разработанного программного продукта.

## Состав котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго

Котельное отделение ТЭЦ-20 Мосэнерго состоит из двух независимых очередей котлоагрегатов:

1. Очередь «90 ата», в которой котлоагрегаты работают при давлении 90 атм.;
2. Очередь «130 ата», в которой котлоагрегаты работают при давлении 130 атм.;

В виду сложности математической модели и большого количества расчетов, а также независимости приведенных выше очередей котлоагрегатов, в данной работе рассматривается только очередь «90 ата».

Очередь «90 ата» состоит из 6 котлоагрегатов, условно обозначаемых: K1, K2, K3, K4, K5, K6. Каждый из них может работать как на газе, так и на мазуте, а также на любой комбинации газа и мазута.

## Математическая модель функционирования котлоагрегатов

В данном разделе выделяются параметры, необходимые для построения математической модели функционирования котлоагрегатов, определяются входные управляемые переменные математической модели и выходные параметры, получаемые после ее расчета. Выполняется построение математической модели в соответствии с поставленной задачей.

### Параметры, используемые в математической модели

Для построения математической модели функционирования котлоагрегатов и проведения расчетов, необходимо учесть параметры, представленные в таблице 1 ниже.

Данные параметры были взяты из [1], где рассматривалась модель функционирования Могилевской ТЭЦ-2. Построенная в [1] математическая модель была успешно внедрена на Могилевской ТЭЦ-2 [1], которая является типичным энергетическим предприятием, в состав которого входят турбинное и котельное отделение. Это позволяет использовать описанные параметры для построения математической модели функционирования и других ТЭЦ, в том числе котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, рассматриваемого в данной работе.

**Таблица 1. Параметры, используемые в математической модели**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Название** | **Обозначение** | **Единица измерения** |
| **Вид, марка, характеристики сжигаемого топлива** | | |
| Низшая теплота сгорания |  | ккал/кг (кДж/кг);  ккал/м3 (кДж/м3) |
| Влажность на рабочую массу |  | % |
| Температура мазута, подаваемого в топку котла |  | oC |
| Цена единицы топлива |  | у.е./т;  у.е./тыс.м3 |
| **Параметры, определяемые при тепловом расчете котельных агрегатов** | | |
| Теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива |  | н.м3/кг |
| Нормативная температура холодного воздуха |  | oC |
| Нормативные присосы воздуха в газовый тракт |  |  |
| Нормативные присосы воздуха в топку |  |  |
| Нормативные потери тепла корпусом котла в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности |  |  |
| Теплосодержание (энтальпия) перегретого пара |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Теплосодержание (энтальпия) питательной воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| **Нормативные характеристики и параметры, определяемые при режимно-наладочных испытаниях энергоагрегатов** | | |
| Теплосодержания (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей |  | oC |
| Температура уходящих газов |  | oC |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % |
| **Корректирующие параметры, замеряемые в процессе эксплуатации при текущем режиме работы** | | |
| Теплосодержания (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг (кДж/кг) |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей |  | oC |
| Температура уходящих газов |  | oC |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % |
| Присосы воздуха в газовый тракт |  |  |
| Присосы воздуха в топку |  |  |
| Нормативная температура холодного воздуха |  | oC |

### Входные управляемые переменные математической модели

В поставленной задаче рассматривается группа котлоагрегатов, работающих на газе или мазуте. При этом каждый из котлоагрегатов, входящий в состав группы, может работать только на одном из видов топлива. В поставленной задаче не рассматривается возможность работы котлоагрегата на смешанном топливе.

Исходя выше сказанного, выделим входные управляемые переменные для математической модели. Опишем их в таблице 2. Для этого скорректируем список управляемых переменных, используемых в [1], в соответствии с требованиями поставленной задачи.

**Таблица 2. Входные управляемые переменные математической модели**

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Состав загружаемых котлоагрегатов | Каждый из котлоагрегатов может находиться в одном из трех состояний:   1. Выключен (0); 2. Включен и работает на газе (Г); 3. Включен и работает на мазуте (М). |
| Паровая нагрузка для каждого котлоагрегата, | Паровая нагрузка котла определяется по режимным картам котла и может принимать значение в пределах от некоторого минимального до некоторого максимального значения |

### Выходные параметры математической модели

Выделим выходные параметры, получаемые при расчете построенной математической модели. Данные параметры представлены ниже, в таблице 3. Выделенные параметры позволяют получить оптимальное решение построенной целевой функции, описанной в п.1. при учете критериев, описанных в п.1.

**Таблица 3. Выходные параметры математической модели**

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Описание** |
| Оптимальный состав загружаемых котлоагрегатов | Одно из трех состояний:   1. Выключен (0); 2. Включен и работает на газе (Г); 3. Включен и работает на мазуте (М),   для каждого из котлоагрегатов. |
| Оптимальная паровая нагрузка для каждого котлоагрегата, | Значение паровой нагрузки для каждого из котлоагрегатов в пределах допустимых значений, взятых из режимных карт котлов. |

### Параметры математической модели, общие для всех котлоагрегатов

В таблице 1 приведены конкретные значения параметров, используемых в математической модели, которые являются общими для всех котлоагрегатов очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго.

**Таблица 1. Параметры, общие для всех котлоагрегатов**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Единицы измерения** | **Значение** |
| Потери тепла с химическим недожогом топлива |  | % | 0 |
| Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива |  | % | 0 |
| Низшая теплота сгорания газа |  | ккал/нм3 | 8440 |
| Низшая теплота сгорания мазута |  | ккал/кг | 9300 |
| Влажность топлива на рабочую массу (для газа) |  | % | 0 |
| Влажность топлива на рабочую массу (для мазута) |  | % | 15% |
| Объемная теплоемкость воздуха |  | ккал/(м3·°С) | 0*.*317 |
| Теоритически объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива |  | н.м3/кг | 10*.*42 |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей (для газа) |  | °С | 30 |
| Температура воздуха после воздухоподогревателей (для мазута) |  | °С | 80 |
| Температура поступающего в топку котла мазута |  | °С | 110 |
| Удельный расход пара на распыливание мазута |  | кг пара / кг мазута | 0*.*02 |
| Теплосодержание пара, поступающего на распыливание |  | ккал/кг | 699*.*1 |
| Теплосодержание пара при давлении и температуре уходящих газов |  | ккал/кг | 600 |
| Температура воздуха на всосе дутьевого вентилятора |  | °С | 30 |
| Поправка на изменение температуры воздуха в вентиляторах за счет его сжатия |  |  | 0 |
| Норма присосов в топку |  |  | 0,05 |
| Норма присосов в газовый тракт (при ) |  |  | 0,1 |
| Норма присосов в газовый тракт (при ) |  |  | 0,25 |
| Теплосодержание (энтальпия) перегретого пара |  | ккал/кг | 814,97 |
| Теплосодержание (энтальпия) питательной воды |  | ккал/кг | 220 |
| Теплосодержание (энтальпия) котловой воды |  | ккал/кг | 334,2 |

### Режимные карты котлоагрегатов котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго очереди «90 ата»

В данном разделе приведены конкретные значения параметров, используемых в математической модели, которые отличаются для каждого из котлоагрегатов. Эти значения получены по режимным картам котлоагрегатов очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго, составлявшимся по результатам режимно-наладочных испытаний котлоагрегатов.

#### Котлоагрегат K-1

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-1 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-1 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 66,08 | 66,05 | 66,1 | 66,1 | 66,15 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,82 | 0,72 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 150 | 152 | 154 | 155 | 156 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,21 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-1 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-1 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | Ы8,38 | 77,94 | 77,64 | 77,55 | 77,67 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,83 | 0,71 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 175 | 176 | 178 | 181 | 186 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,53 | 1,43 | 1,37 | 1,33 | 1,30 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,39 | 1,31 | 1,25 | 1,22 | 1,2 |

#### Котлоагрегат K-2

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-2 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-2 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 55,58 | 55,52 | 55,45 | 55,52 | 55,62 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 0,97 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 136 | 138 | 140 | 142 | 145 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,30 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,17 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,15 | 1,12 | 1,11 | 1,1 | 1,09 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-2 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-2 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | Ы8,7 | 88,03 | 77,85 | 77,69 | 77,63 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,13 | 0,93 | 0,78 | 0,68 | 0,6 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 170 | 172 | 176 | 179 | 181 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,62 | 1,46 | 1,38 | 1,32 | 1,29 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,48 | 1,34 | 1,27 | 1,21 | 1,19 |

#### Котлоагрегат K-3

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-3 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-3 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 66,74 | 66,18 | 55,95 | 55,84 | 55,74 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,19 | 1,07 | 0,95 | 0,87 | 0,8 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 150 | 149 | 149 | 149 | 148 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,39 | 1,29 | 1,24 | 1,22 | 1,21 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,21 | 1,12 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-3 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-3 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 110 | 130 | 150 | 170 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 9,37 | 8,91 | 8,42 | 8,21 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,77 | 0,65 | 0,57 | 0,5 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 180 | 182 | 184 | 185 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,88 | 1,75 | 1,62 | 1,56 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,74 | 1,62 | 1,5 | 1,45 |

#### Котлоагрегат K-4

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-4 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-4 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,57 | 5,66 | 5,7 | 5,75 | 5,79 | 5,84 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1 | 0,87 | 0,77 | 0,69 | 0,62 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 149 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,17 | 1,16 | 1,15 | 1,15 | 1,14 | 1,14 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-4 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-4 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 7,71 | 7,72 | 7,73 | 7,78 | 7,84 | 7,94 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,97 | 0,84 | 0,74 | 0,67 | 0,6 | 0,55 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 175 | 176 | 177 | 178 | 180 | 182 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,42 | 1,41 | 1,4 | 1,4 | 1,39 | 1,39 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

#### Котлоагрегат K-5

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-5 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-5 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,25 | 5,23 | 5,2 | 5,23 | 5,33 | 5,42 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,01 | 0,87 | 0,77 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 138 | 140 | 141 | 142 | 143 | 145 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,17 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,1 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,05 | 1,05 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-5 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-5 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 7,41 | 6,79 | 6,7 | 6,5 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,77 | 0,69 | 0,62 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 164 | 165 | 162 | 162 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,54 | 1,43 | 1,43 | 1,42 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,3 | 1,19 | 1,19 | 1,19 |

#### Котлоагрегат K-6

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-6 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на природном газе.

**Таблица 1. Режимная карта К-6 при работе на природном газе.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 5,62 | 5,66 | 5,69 | 5,73 | 5,78 | 5,8 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 1,01 | 0,87 | 0,77 | 0,57 | 0,57 | 0,57 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 142 | 146 | 149 | 151 | 153 | 155 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,20 | 1,17 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,12 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1.13 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,09 | 1,09 |

В таблице 1 приведена режимная карта котлоагрегата K-6 очереди «90 ата» ТЭЦ-20 Мосэнерго при работе на мазуте.

**Таблица 1. Режимная карта К-6 при работе на мазуте.**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Обозначение** | **Ед. измерения** | **Диапазон рабочей паропроизводительности** | | | |
| Паропроизводительность |  | т/ч | 170 | 190 | 210 | 230 |
| Потери тепла с уходящими газами |  | % | 8,47 | 8,1 | 7,56 | 7,32 |
| Потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения |  | % | 0,74 | 0,67 | 0,6 | 0,55 |
| Температура уходящих газов |  | oC | 183 | 184 | 184 | 185 |
| Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах |  |  | 1,61 | 1,52 | 1,4 | 1,34 |
| Коэффициент избытка воздуха в режимном сечении |  |  | 1,52 | 1,43 | 1,32 | 1,26 |

### Построение регрессионных полиномов

В [дил] рассматриваются условия функционирования Могилевской ТЭЦ-2. Для выделенных параметров, описанных в п.1, в [дил] методами регрессионного анализа были установлены их функциональные зависимости от текущей паровой нагрузки котлоагрегатов. В ходе этого анализа было выявлено, что наиболее удовлетворительным видом функциональных зависимостей являются регрессионные полиномы третьей степени [дил]:

где – паровая нагрузка котлоагрегата, *i* = 1..*n*, где *n* – количество наблюдений.

Могилевская ТЭЦ-2 является типичным энергетическим предприятием, - это позволяет считать полученные функциональные зависимости, установленные для Могилевской ТЭЦ-2 справедливыми также и для других ТЭЦ.

Опишем общий алгоритм построения регрессионных полиномов третьей степени.

В соответствии с методом наименьших квадратов [общ. Теория статистики], для определения параметров полинома третьей степени (номер) строится следующая система линейных алгебраических уравнений:

Обозначим:

где n – количество наблюдений.

регрессионная матрица размером n \* k, где k – количество оцениваемых параметров. В данном случае, k = 4.

вектор параметров.

Исходя из этого, система линейных алгебраических уравнений (1) принимает следующий вид:

Далее, при подстановке исходных данных из наблюдений, вычисляются коэффициенты матриц и . А затем, решая полученную систему (1 – формула выше), находим коэффициенты регрессионного полинома третьей степени .

### Функциональные зависимости параметров котлоагрегатов очереди «90 ата» от паровой нагрузки

Построим регрессионные полиномы третьей степени для параметров котлоагрегатов очереди «90 ата». Необходимо получить функциональные зависимости от паровой нагрузки для следующих параметров:

1. потери тепла с уходящими газами ,
2. потери тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения ,
3. температура уходящих газов ,
4. коэффициент избытка воздуха в уходящих газах ,
5. коэффициент избытка воздуха в режимном сечении .

Для каждого из перечисленных выше параметров решим систему линейных алгебраических уравнений, описанную в п.1, используя значения, полученные по режимным картам котлоагрегатов, приведенным в п.1.

В таблицах 1-2 ниже приведены построенные функциональные зависимости – регрессионные полиномы третьей степени – параметров котлоагрегатов от паровой нагрузки при использовании различных видов топлива.

**Таблица 1. Функциональные зависимости потерь тепла с уходящими газами () от паровой нагрузки ()**

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

**Таблица 1. Функциональные зависимости потерь тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения () от паровой нагрузки ()**

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

**Таблица 1. Функциональные зависимости температуры уходящих газов () от паровой нагрузки ()**

|  |  |
| --- | --- |
| **Топливо - Газ** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |
| **Топливо - Мазут** | |
| K1 |  |
| K2 |  |
| K3 |  |
| K4 |  |
| K5 |  |
| K6 |  |

**Таблица 1. Функциональные зависимости коэффициентов избытка воздуха в уходящих газах () от паровой нагрузки ()**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Топливо - Газ** | | |
| K1 |  |  |
| K2 |  |  |
| K3 |  |  |
| K4 |  |  |
| K5 |  |  |
| K6 |  |  |
| **Топливо - Мазут** | | |
| K1 |  |  |
| K2 |  |  |
| K3 |  |  |
| K4 |  |  |
| K5 |  |  |
| K6 |  |  |

**Таблица 1. Функциональные зависимости коэффициентов избытка воздуха режимном сечении () от паровой нагрузки ()**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Топливо - Газ** | | |
| K1 |  |  |
| K2 |  |  |
| K3 |  |  |
| K4 |  |  |
| K5 |  |  |
| K6 |  |  |
| **Топливо - Мазут** | | |
| K1 |  |  |
| K2 |  |  |
| K3 |  |  |
| K4 |  |  |
| K5 |  |  |
| K6 |  |  |

### Базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегатом

В данном разделе приводится базовая математическая модель расхода топлива котлоагрегата, и подробно описываются зависимости между входящими в математическую модель параметрами.

Для наглядности, модель расхода топлива котлоагрегатом удобно представить в виде иерархической структуры – дерева, узлами которого являются энергетические характеристики и исходные данные, требуемые для расчетов.

Данная структура приведена ниже, на рисунке 1.

Рис.1. Структура модели расхода топлива котлоагрегатом

Базовая модель расхода топлива котлоагрегатом строится на основе типовых методик расчета энергетических характеристик котлоагрегатов [дил 48, 81, 82].

Значения параметров и характеристик, встречающихся в математической модели расхода топлива котлоагрегатом, а также их единицы измерения описаны в таблицах 1,2 выше.

Целевая функция расхода топлива представляется в виде:

где – количество потребляемого топлива [т.н.т./час]. – тепловая нагрузка, которую необходимо обеспечить (заданная, плановая величина) [Гкал/час]. – располагаемое тепло [ккал/час]. – КПД котла брутто [%].

Располагаемое тепло описывается соотношением:

где – низшая теплота сгорания топлива (для газа или мазута, соответственно). - тепло, вносимое в котел воздухом. - тепло, вносимое в котел мазутом. - тепло, внесенное в топку форсуночным паром.

Тепло, вносимое в котел воздухом , вычисляется по формуле:

где – объемная теплоемкость воздуха, – теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания топлива. - коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель, - температура воздуха после воздухоподогревателей, - температура воздуха перед воздухоподогревателями.

Коэффициент избытка воздуха на входе в воздухоподогреватель , вычисляется по формуле:

где – коэффициент избытка воздуха в режимном сечении, – нормативная величина присосов воздуха в топку, – нормативная величина присосов воздуха в газовый тракт.

Нормативная величина присосов воздуха в топку описывается соотношением:

где – норма присосов в топку, – номинальная паропроизводительность данного котла, – паровая нагрузка.

Нормативная величина присосов воздуха в газовый тракт, определяется как:

где – норма присосов в газовый тракт.

Температура воздуха перед воздухоподогревателями , рассчитывается из следующего соотношения:

где – температура холодного воздуха на всосе дутьевого вентилятора, – поправка на изменение температуры воздуха в дутьевых вентиляторах за счет его сжатия.

Тепло, вносимое в котел мазутом определяется зависимостью:

где - удельная теплоемкость мазута при температуре его поступления в топку, - температура поступающего в топку котла мазута, нагретого вне его.

Тепло , внесенное в топку форсуночным паром, вычисляется по формуле:

где - удельный расход пара на распыливание 1 кг мазута, -энтальпия пара, поступающего на распыливание мазута, - энтальпия пара при давлении и температуре уходящих газов.

КПД брутто вычисляется из соотношения:

где - потери тепла с уходящими газами, - потери тепла c химическим недожогом топлива, – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива, - потеря тепла в окружающую среду за счет конвекции и излучения наружными поверхностями.

Потери тепла с уходящими газами вычисляются по формуле:

где - коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива; – температура уходящих газов; - поправочный коэффициент, учитывающий внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом.

При использовании котлом мазута, справедливы соотношения:

где – влажность топлива на рабочую массу.

При использовании газа в качестве топлива, принимают , , .

Коэффициент определяется зависимостью:

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах описывается соотношением:

Поправочный коэффициент учитывает внесенное в топку котла тепло с паром, подогретым воздухом и топливом:

Величина определяется соотношением:

где - нормативные потери тепла котлом (корпусом котла) в окружающую среду при номинальной часовой паропроизводительности.

Совокупность описанных выше выражений (номера) представляет собой базовую математическую модель расхода топлива котлоагрегатом.

### Правки к математической модели

### Целевые функции для выбранных критериев

Сформулируем целевые функции для описанных в п.1 критериев оптимизации поставленной задачи, с учетом математической модели расхода топлива, описанной в разделе 1.2.8 и правок к математической модели из раздела 1.2.9.

#### Критерий расхода газа

Рассмотрим формулу критерия расхода условного топлива, приведенную в [дил]:

где , – топливные эквиваленты, показывающие какому количеству условного топлива равноценна единица массы (или объема) мазута и газа соответственно, – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, – вектор, характеризующий доли использования разных видов топлива всеми агрегатами.

С учетом того, что мы рассматриваем n котлов, работающих только на газе, формулу для критерия расхода газа представим в следующем виде:

где – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности *i*-ым парогенератором;

– вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на газе.

#### Критерий расхода мазута

Для построения формулы критерия расхода мазута воспользуемся теми же рассуждениями, что и в разделе 1.2.10.1. В результате критерий расхода мазута представим в следующем виде:

где – расход газа для обеспечения текущей паропроизводительности *i-*ым парогенератором;

– вектор паропроизводительностей *m* котлоагрегатов, работающих на мазуте.

#### Критерий финансовых затрат на используемое топливо

Рассмотрим формулу критерия финансовых затрат на используемое комбинированное топливо, приведенную в [дил]:

где , – цены на жидкое топливо и газ соответственно.

При рассмотрении n котлов, работающих только на газе, с учетом приведенной выше формулы (1), формулу для финансовых затрат на газ представим в следующем виде:

где – цена на газ; – вектор паропроизводительностей *n* котлоагрегатов, работающих на газе. – расход газа для обеспечения паропроизводительности .

Для m котлов, работающих только на мазуте, формулу финансовых затрат на мазут представим в следующем виде:

где – цена на мазут; – вектор паропроизводительностей *m* котлоагрегатов, работающих на жидком топливе (мазуте). – расход мазута для обеспечения паропроизводительности .

Таким образом, общую формулу критерия финансовых затрат на используемое топливо (газ + мазут) можно представить в следующем виде:

#### Критерий КПД группы работающих котлоагрегатов

Как было определено в п.2, КПД группы котлоагрегатов будем вычислять как средневзвешенную КПД всех котлов.

Рассмотрим формулу, описывающую КПД группы котлоагрегатов, работающих на комбинированном топливе, приведенную в [дил]:

где , – КПД i-го агрегата при работе на мазуте и на газе, соответственно, - теплопроизводительность *i*-го агрегата.

Исходя из приведенной выше формулы (3.8), построим формулу, применимую для котлоагрегатов, работающих только на газе. Она примет следующий вид:

где = – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на газе; – КПД полезного действия i-го котлоагрегата, работающего на газе; – теплопроизводительность i-го агрегата, работающего на газе.

Сформулируем то же самое для котлоагрегатов, использующих только жидкое топливо (мазут):

где = – вектор паропроизводительностей n котлоагрегатов, работающих на мазуте; – КПД полезного действия i-го котлоагрегата, работающего на мазуте; – теплопроизводительность i-го агрегата, работающего на мазуте.

Приведем формулу для КПД группы работающих агрегатов (использующих и газ и мазут), в соответствии с (3.9, 3.10). Она принимает следующий вид:

Таким образом в разделах 1.2.10.1 – 1.2.10.4 были сформулированы формулы для критериев, описанных в разделе 1.

### Ограничения

При постановке задачи оптимизации режимов работы очереди котлоагрегатов в п.2. были рассмотрены ограничения, которые необходимо учитывать при решении. Приведем для них математические формулы [дил].

Суммарная паропроизводительность группы котлоагрегатов:

где – паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – суммарная паропроизводительность группы работающих котлоагрегатов.

Диапазоны рабочей производительности для каждого из котлоагрегатов:

где – минимально возможная паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – максимально возможная паропроизводительность *i*-го котлоагрегата; – текущая паропроизводительность *i*-го котлоагрегата.

### Задача многокритериальной оптимизации

С учетом критериев (3.2, 3.3, 3.7, 3.12): и ограничений (3.13, 3.14), рассмотренных в п.3.1-3.5, задача оптимизации режимов работы очереди котлоагрегатов принимает следующий вид:

При совокупности следующих ограничений:

Составим общую целевую функцию F, которую необходимо будет минимизировать. Для этого критерий КПД группы котлоагрегатов включим в эту функцию со знаком минус, сведя таким образом операцию максимизации к операции минимизации:

В процессе оптимизации необходимо определить n-1 переменных - . Переменная определяется из соотношения:

## Метод решения многокритериальной оптимизационной задачи

В данном разделе описывается разработанный метод для проведения многокритериальной оптимизации очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго с выбором наиболее подходящего состава энергоагрегатов, который является комбинацией методов, представленных в [1], [2] c некоторыми дополнениями и ограничениями, исходя из постановки задачи (раздел 1).

Предлагаемый метод состоит из двух шагов, разбивающихся, в свою очередь, на более мелкие:

1. Формирование множества возможных векторых критериев;
2. Выбор наилучшего векторного критерия из множества возможных.

Рассмотрим данные шаги подробнее.

### Формирование множества возможных векторных критериев

Важной проблемой [дил] является выбор оптимального состава энергоагрегатов. Возможны ситуации [дил], когда для улучшения целевой функции целесообразно нагружать не все работоспособные в данный момент котлоагрегаты.

Рассмотрим группу, состоящую из *n* котлоагрегатов, каждый из которых может работать либо на газе, либо на жидком топливе (мазуте).

Каждый из котлов может находиться в одном из трех состояний (работает на газе / работает на мазуте / не работает). Таким образом, всего получим *3n* вариантов различных состояний для группы котлоагрегатов.

Необходимо перебрать все возможные составы группы котлоагрегатов и варианты использования ими различного топлива и сформировать векторные критерии для каждого из них.

При формировании очередной комбинации нагружаемых агрегатов необходимо проверять [дил] выполнение условия обеспечения заданной суммарной паропроизводительности:

После построения комбинации котлоагрегатов, при условии выполнения ограничения (1), необходимо провести «локальную» многокритериальную оптимизацию целевой функции, описываемой формулой (3.17), при совокупности ограничений (3.16).

Вследствие этого будут получены значения для критериев (3.2, 3.3, 3.7, 3.12), из которых составляется векторный критерий на текущем шаге *i*:

После перебора всех возможных комбинаций и формирования векторных критериев для них, получим множество векторных критериев:

где *n* – количество комбинаций нагружаемых котлоагрегатов, удовлетворяющих ограничению (4.1).

### Выбор наилучшего векторного критерия

Выбор наиболее подходящего векторного критерия из множества (раздел 1.3.1) делится на 2 шага:

1. Построение множества Парето и его последовательное сужение [2];
2. Применение метода целевого программирования [3] для выбора оптимального векторного критерия.

Для возможности построения множества Парето, необходимо сформулировать отношения предпочтения и сформировать коэффициенты относительной важности *i*-го критерия по сравнению с *j*-ым критерием:

где , - положительные параметры, с которыми i-й критерий ( важнее j-го критерия . Это означает [2], что всякий раз ради увеличения значения более важного i-го критерия на единиц ЛПР готово пожертвовать единицами по менее важному j-му критерию.

Эти действия должно осуществлять лицо, принимающее решение (ЛПР). Реализованное программное обеспечение (ПО) для решения поставленной задачи оптимизации имеет экспертный блок, позволяющий задавать необходимые коэффициенты. Таким образом, в описанном процессе, в качестве ЛПР выступает эксперт, непосредственно работающий с разработанным ПО.

ЛПР должно быть заинтересовано в минимизации каждой из функций , участвующих в задаче. Если какой-то из критериев для ЛПР желательно не минимизировать, а максимизировать, то его в математическую модель следует включить со знаком минус [2]. Этот подход позволяет свести операцию максимизации к операции минимизации.

Таким образом, критерий (3.12) будем включать в математическую модель со знаком минус.

После построения множества Парето по найденному множеству возможных векторов *U*, согласно методу последовательного сужения множества Парето [2], менее важный *j*-й критерий в общем списке критериев необходимо заменить новым, вычисленным по формуле . Затем следует найти множество Парето относительно нового векторного критерия. [2].

После построения нового множества, в случае, если оно оказывается приемлемым для окончательного выбора, процесс принятия решений заканчивается. В противном случае дальнейший выбор следует производить в пределах найденного множества Парето [2].

#### Метод целевого программирования

После построения и последовательного сужения множества Парето (раздел 1.3.2) будем применять метод целевого программирования [3] для окончательного выбора оптимального векторного критерия.

В качестве входных данных имеем набор векторных критериев Каждый из критериев необходимо минимизировать на множестве возможных решений . Здесь и далее *m* = 4, так как задача решается с учетом 4 критериев.

В рамках метода целевого программирования полагается, что в пространстве *Rm* задано непустое множество *U*, которое называют множеством «идеальных» векторов. Данное множество считается недостижимым, т.е. выполняется равенство [2]:

где – множество возможных векторов.

Т.к. в нашем случае все критерии необходимо минимизировать, то в качестве такого «идеального» множества векторов будем рассматривать множество, состоящее из одного вектора – начала координат:

Кроме этого, на критериальном пространстве задается метрика – числовая функция которая каждой паре векторов *y, z* сопоставляет неотрицательное число, называемое расстоянием между векторами *y* и *z*.

Будем использовать квадратичную метрику, описывающую квадрат расстояния:

Оптимальным объявляется такое решение для которого выполняется равенство [2]:

которое означает, что оценка , соответствующая наилучшему решению , должна быть расположена как можно ближе к множеству идеальных оценок.

Таким образом, совокупность разделов 1.3.1 и 1.3.2 представляет собой описание предложенного для решения поставленной многокритериальной задачи метода.

## Алгоритм решения многокритериальной оптимизационной задачи

В данном разделе подробно описывается алгоритм, реализующий решение предложенного в п. 1.3 метода.

### Алгоритм прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

В данном разделе приводится алгоритм реализации метода прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска, который был выбран для решения многокритериальной оптимизационной задачи (п.1 в аналитической части).

В таблице 1 ниже приведены исходные данные, необходимые для решения стандартной оптимизационной задачи.

**Таблица 1. Исходные данные стандартной оптимизационной задачи**

|  |  |
| --- | --- |
| **Название** | **Обозначение** |
| Минимизируемая функция *f* от *n* переменных |  |
| Допустимые границы варьирования переменных *xi* |  |
| Функциональные ограничения | где c – количество функциональных ограничений |

Поиск оптимального решения осуществляется в *Q* сериях по *P* итераций в каждой серии. Количество итераций в серии *P* определяется в результате исследования конкретной модели в зависимости от ее сложности (количества переменных, ширины их диапазонов варьирования).

Количество серий *Q* определяется из соображений точности, накладываемой на искомые параметры:

где *eps* – точность вычислений, – параметр, определяющий уменьшение интервала поиска (обычно принимается = 0.05), – диапазон варьирования неизвестных : = - , *i = 1..n.*

В результате математических преобразований выражение для *Q* представляется в форме:

Алгоритм прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска состоит из следующих шагов:

**Шаг 1.** Определяется начальное решение. Оно получается как середины варьируемых диапазонов для каждой переменной:

Формируется вектор начальных решений . Векторы оптимальных решений и промежуточного оптимума полагаются равными :

**Шаг 2.** Вычисляется случайная точка *x*:

где *r* – случайная величина, равномерно распределенная на интервале (-0.5; 0.5).

**Шаг 3.** Выполняется проверка на допустимость:

- если , то принимаем ;

- если то принимаем

Также на данном шаге производится проверка на удовлетворение функциональным ограничениям, описанным в таблице 1. Если найденная точка не удовлетворяет хотя бы одному из них – она отбрасывается, и происходит возвращение на **Шаг 2** алгоритма.

**Шаг 4.** Вычисляется функция Если значение то принимаем . Если *p < P*, то увеличиваем p на 1 и переходим к **Шагу 2** алгоритма. Если *p = P*, - переходим к **Шагу 5**.

**Шаг 5**. Если *q < Q*:

- принимаем

- уменьшаем интервал поиска*:*

- увеличиваем *Q* на 1 и переходим к **Шагу 2.**

Если *q = Q*, - то заканчиваем вычисления.

### Модификация алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

Для возможности применения описанного в п. 1.4.1 алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска для решения поставленной (в п.1) задачи оптимизации в данный алгоритм необходимо внести модификации.

В соответствии с поставленной задачей многокритериальной оптимизации (п.1) каждый из котлоагрегатов, находящихся в составе очереди «90 ата» котельного отделения ТЭЦ-20 Мосэнерго, может иметь значение паропроизводительности , находящееся в заданных для него пределах .

Паровая нагрузка котлоагрегата – это входной управляющий параметр математической модели (таблица 1).

Рассмотрим ситуацию, когда группе котлоагрегатов необходимо обеспечить суммарную паропроизводительность = 500 т/ч.

Пусть текущая комбинация работающих котлоагрегатов состоит из 3 котлов: **K1** (, **K2** , **K3**

Так как , - данная комбинация работающих котлоагрегатов является допустимой.

Согласно описанному в п.1.4.1 алгоритму, на **Шаге 1** необходимо выбрать начальное решение, при этом значения выбираются как середины соответствующих интервалов допустимых значений.

Тогда для переменных ,, получим:

;

;

= 240 т/ч.

В результате, для будет получено недопустимое значение, которое не входит в заданные для этого котлоагрегата допустимые границы варьирования паропроизводительности.

В соответствии с этим для **Шага 1** описанного в п.1 алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска была разработана следующая модификация. Выбор начального решения осуществляется по следующему алгоритму:

1. Для всех , принять:
2. = ,

где – заданная суммарная паропроизводительность, которую должна обеспечить группа котлоагрегатов.

1. Если , - завершить алгоритм выбора начального решения, иначе, - перейти к пункту 4.
2. Если , - перейти к пункту 5. Если , - это означает, что котлоагрегаты *1..n-1* нагружены на столько, что могут выполнить (или перевыполнить) план по суммарной паропроизводительности, соответственно, их нужно «разгрузить», - переходим к пункту 8.
3. Если , - это говорит о том, что паровая нагрузка, которую должен иметь *n*-ый котел в данной комбинации, чтобы обеспечить выполнения общего плана паропроизводительности очереди котлоагрегатов, превышает максимально допустимую паровую нагрузку для *n*-го котлоагрегата. Соответственно, необходимо сильнее нагрузить котлоагрегаты *1..n-1*. Переходим к пункту 6. Если , - это говорит о том, что паровая нагрузка, «оставшаяся» для n-го котла, меньше минимально допустимой паровой нагрузки для этого котла. Соответственно, необходимо «разгрузить» котлоагрегаты *1..n-1* и сильнее нагрузить *n*-ый котлоагрегат. Переходим к шагу 7.
4. Принять:

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

1. Принять

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

1. Принять

До тех пор, пока *i > 0* выполнять:

Если

Иначе завершить цикл по *i.*

*i = i – 1.*

Приведем блок-схему алгоритма формирования множества возможных векторных критериев, реализующего предложенный в разделе 1 метод, с учетом алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска, описанного в разделе 1.4.1 , а также его модификаций, сформулированных в разделе 1.4.2.

Блок-схема общего алгоритма представлена на рисунках 1-3 ниже.



Рис.1. Общая схема алгоритма формирования множества векторных критериев



Рис. 2. Алгоритм «локальной» оптимизации группы котлоагрегатов



Рис.3. Модификация алгоритма прямых выборочных процедур с уменьшением интервала поиска

## Структура программного продукта