ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 113.38.02— 2019

НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические рекомендации по оценке затрат предприятий электроэнергетики по снижению выбросов загрязняющих веществ для достижения ими технологических показателей наилучших доступных технологий

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным автономным учреждением «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»), Федеральным государственным бюджетным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 113 «Наилучшие доступные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 августа 2019 г. № 557-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

© Стандартинформ, оформление, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 1
4 Алгоритм расчета затрат на снижение выбросов загрязняющих веществ тепловых электростанций 3
5 Обобщенный алгоритм выбора наилучших доступных технологий и перспективных технологий для снижения выбросов загрязняющих веществ 4
6 Алгоритм расчета затрат на снижение выбросов загрязняющих веществ для энергетической отрасли 7
Приложение А (обязательное) Расчет содержания загрязняющих веществ в выбросах энергетической установки 10
Приложение Б (обязательное) Капитальные и эксплуатационные затраты на НДТ 19
Приложение В (справочное) Пример расчета объема репрезентативной выборки 21
Библиография 23

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические рекомендации по оценке затрат предприятий электроэнергетики по снижению выбросов загрязняющих веществ для достижения ими технологических показателей наилучших доступных технологий

Best available techniques. Guidelines for estimating the cost of power industry enterprises to reduce emissions of pollutants to achieve the technological indicators of the best available techniques

Дата введения — 2020—05—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на деятельность по производству электрической и тепловой энергии на тепловых электростанциях (ТЭС), отнесенных на основании [1] к I категории предприятий, то есть к предприятиям, оказывающим значительное негативное воздействие на окружающую среду.

Методические рекомендации (далее — методика) предназначены для оценки затрат на снижение выбросов загрязняющих веществ [оксиды азота NO_x, диоксид серы SO_2, твердые вещества (летучая зола)] до технологических показателей для газовых и угольных ТЭС.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 19431 Энергетика и электрификация. Термины и определения

ГОСТ 26691 Теплоэнергетика. Термины и определения

ГОСТ Р 51852 (ИСО 3977-1—97) Установки газотурбинные. Термины и определения

ГОСТ Р 54974 Котлы стационарные паровые, водогрейные и котлы-утилизаторы. Термины и определения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 19431, ГОСТ 26691, ГОСТ Р 51852, ГОСТ Р 54974, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **доверительная вероятность:** Вероятность того, что истинное значение измеряемой величины попадает в данный доверительный интервал.

Издание официальное

3.1.2

доверительный интервал: Численный диапазон, в пределах которого, по оценкам, содержится изучаемый параметр.

[ГОСТ Р 56258—2014, статья 3.73]

3.1.3

уровень значимости (критерия): Заданное значение верхнего предела вероятности ошибки первого рода.

Примечание — Уровень значимости обычно обозначают α.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 2.70]

3.1.4

ошибка первого рода: Ошибка, состоящая в отбрасывании нулевой гипотезы, поскольку статистика принимает значение, принадлежащее критической области, в то время как эта нулевая гипотеза верна.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 2.75]

3.1.5

(генеральная) совокупность: Множество всех рассматриваемых единиц.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 2.3]

3.1.6

выборочная единица: Одна из конкретных единиц, из которых состоит генеральная совокупность.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 4.1]

3.1.7

выборка [проба]: Одна или несколько выборочных единиц, взятых из генеральной совокупности и предназначенных для получения информации о ней.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 4.2]

3.1.8

объем выборки: Число выборочных единиц в выборке.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 4.3]

3.1.9

выборка без возвращения: Выборка, в которую единицы отбирают из совокупности только один раз или последовательно и не возвращают в нее.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 4.7]

3.1.10

расслоенная выборка [проба]: В совокупности, которую можно разделить на различные взаимно исключающие и исчерпывающие подсовокупности, называемые слоями, отбор, проводимый таким образом, что в выборку [пробу] отбирают определенные доли от разных слоев и каждый слой представляют хотя бы одной выборочной единицей.

[ГОСТ Р 50779.10—2000, статья 4.14]

3.1.11

страта (слой): Подгруппа множества данных, разделенная в пространстве или во времени (или же там и там) от остальной части множества, внутренне схожая с другими стратами по отношению к исследуемой характеристике, но отличающаяся от соседних страт множества данных.

[ГОСТ Р 56258—2014, статья 3.349]

3.1.12

репрезентативная совокупность: Представительность (высокая степень сходства) отобранной части объектов из всей изучаемой генеральной совокупности в отношении изучаемых характеристик.

[ГОСТ Р 56087.2—2014, пункт 3.10]

3.1.13

репрезентативная проба: Проба, отбираемая таким образом, чтобы она достоверно отражала соответствие одной или нескольких представляющих интерес характеристик определенным проектным требованиям для множества, из которого эта проба отбиралась.

[ГОСТ Р 56258—2014, статья 3.277]

3.1.14 **стандартные условия:** Сухие дымовые газы при содержании кислорода (O_2), равном 6 % для котельных установок и 15 % — для газотурбинных установок, и нормальных условиях.

3.1.15 **бесповторный отбор:** Отбор, при котором каждый отобранный объект изымают и не возвращают в генеральную совокупность и не используют в дальнейшем отборе.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ЖШУ — жидкое шлакоудаление;
ЗАГ — зона активного горения;
ЗВ — загрязняющие вещества;
ЗУ — золоуловитель;
НДТ — наилучшие доступные технологии;
РФ — рукавный фильтр;
СНКВ — селективное некаталитическое восстановление;
ТШУ — твердое шлакоудаление;
ЭФ — электрофильтр.

4 Алгоритм расчета затрат на снижение выбросов загрязняющих веществ тепловых электростанций

4.1 Для оценки затрат на снижение выбросов ЗВ при переходе ТЭС на принципы НДТ необходимы следующие исходные данные:

- число и мощность энергоустановок, работающих на ТЭС;
- сроки ввода энергоустановок в эксплуатацию;
- вид сжигаемого топлива;
- фактические концентрации загрязняющих веществ в выбросах;
- концентрации загрязняющих веществ в выбросах, соответствующих требованиям НДТ (технологические показатели);
- справочные значения удельных капитальных и эксплуатационных затрат на сооружение природоохранного оборудования.

4.2 Расчет затрат на снижение выбросов ЗВ ТЭС проводят в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 1.

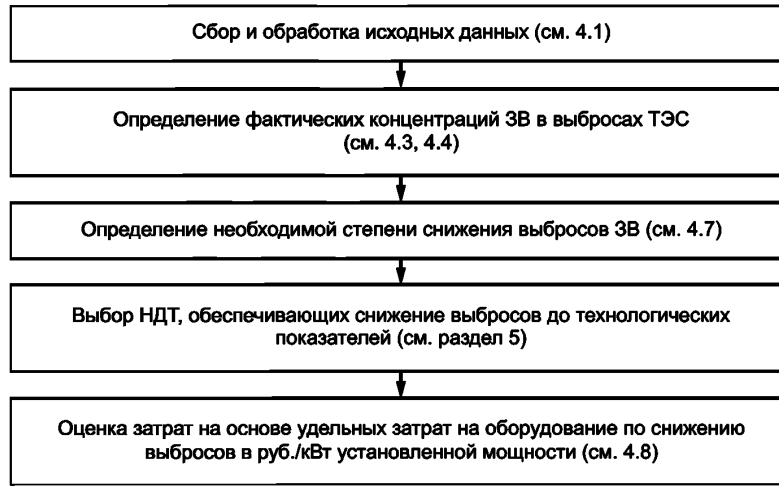


Рисунок 1 — Алгоритм оценки затрат на снижение выбросов ТЭС до технологических показателей

4.3 Данные о фактических концентрациях загрязняющих веществ в выбросах ТЭС могут быть получены путем прямых инструментальных измерений массовых концентраций на номинальной нагрузке C_m, г/м^3 или мг/м^3, пересчитанных на стандартные условия.

4.4 При отсутствии возможности получения данных о фактических концентрациях ЗВ в выбросах ТЭС путем прямых инструментальных измерений эти значения могут быть определены расчетным путем по приложению А.

4.5 Технологические показатели, применяемые для проведения расчетов в данной методике $C_{НДТ}$, соответствуют технологическим показателям НДТ, устанавливаемых нормативными документами в области охраны окружающей среды.

4.6 Соответствие фактических концентраций ЗВ в выбросах ТЭС технологическим показателям проводят для следующих загрязняющих веществ:

- на ТЭС, сжигающих в качестве основного топлива природный газ, — оксиды азота $NO_x = NO + NO_2$;
- на ТЭС, сжигающих твердое топливо, — оксиды азота $NO_x = NO + NO_2$, диоксид серы SO_2, твердые частицы.

4.7 Для определения необходимой степени снижения выбросов ЗВ до уровня технологических показателей необходимо сравнить значения фактических массовых концентраций C_m по каждому загрязняющему веществу с соответствующими технологическими показателями $C_{НДТ}$.

Сравнение C_m и $C_{НДТ}$ проводят в зависимости от следующего:

- вида топлива (твердое топливо, газ, мазут);
- тепловой мощности (50—100; более 100 до 300; более 300 МВт);
- срока ввода в эксплуатацию (котельные установки, введенные по проектам, утвержденным до 31.12.1981 г.; котельные установки, спроектированные после 01.01.1982 г. и введенные до 31.12.2000 г.; котельные установки, введенные с 01.01.2001 г.).

При этом необходимую степень снижения выбросов ΔC_i, %, вычисляют по формуле

$$\Delta C_i = \frac{C_{m_i} - C_{НДТ}}{C_{m_i}} \cdot 100, \quad (1)$$

где C_{m_i} — фактическая массовая концентрация i-го ЗВ в выбросах.

4.8 Затраты на оборудование по снижению выбросов ЗВ для каждой энергетической установки $З_{сум}$, руб., вычисляют как сумму капитальных затрат $З_{кап}$ и эксплуатационных затрат $З_{эксп}$ по формуле

$$З_{сум} = З_{кап} + З_{эксп}. \quad (2)$$

Капитальные затраты $З_{кап}$, руб., вычисляют по формуле

$$З_{кап} = З_{уд.\ кап} \cdot N_{эл}, \quad (3)$$

где $З_{уд.\ кап}$ — справочные значения удельных капитальных затрат на оборудование по снижению выбросов, приведенные в приложении Б, руб./кВт;

$N_{эл}$ — установленная электрическая мощность рассматриваемой энергетической установки, кВт.

Эксплуатационные затраты $З_{эксп}$, руб., рассчитывают по формуле

$$З_{эксп} = З_{уд.\ эксп} \cdot T \cdot N_{эл} \cdot \sum_{l=1}^{t} \left(1 + \frac{r}{100}\right)^l, \quad (4)$$

где $З_{уд.\ эксп}$ — справочные значения удельных эксплуатационных затрат на оборудование по снижению выбросов, приведенные в приложении Б, руб./кВт · ч;

T — среднее время работы оборудования по снижению выбросов за год, ч;

t — срок эксплуатации основных фондов, который принимают равным 15 годам;

r — коэффициент, характеризующий инфляцию (прирост цен) за 1-й год (выбирают по официальным прогнозам Минэкономразвития), %.

5 Обобщенный алгоритм выбора наилучших доступных технологий и перспективных технологий для снижения выбросов загрязняющих веществ

5.1 Основными критериями для выбора наилучших доступных и перспективных технологий являются:

- требуемая степень снижения выбросов, определенная в соответствии с 4.7;
- сроки реализации мероприятий (внедрения технологий). Данный критерий характеризует период простоя действующего оборудования;
- капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию, рассчитанные в соответствии с 4.8.

5.2 Выбор наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов ЗВ на конкретном объекте проводят в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2.

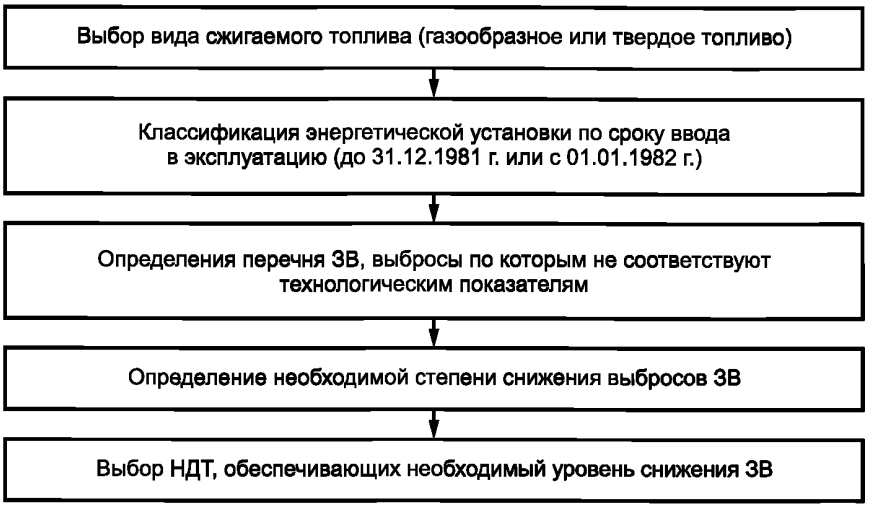


Рисунок 2 — Обобщенный алгоритм выбора НДТ для энергоустановок

5.3 При сжигании газообразного топлива выбор наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов оксидов азота рекомендуется проводить из перечня, представленного в таблице 1, в зависимости от необходимой степени снижения выбросов.

5.4 При сжигании твердого топлива в зависимости от необходимой степени снижения выбросов выбор наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов ЗВ рекомендуется проводить из перечней, представленных:

- в таблице 2 — для оксидов азота;
- в таблице 3 — для диоксида серы;
- в таблице 4 — для твердых частиц.

Таблица 1 — Перечень рекомендуемых наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов оксидов азота при сжигании газообразного топлива

Необходимая степень очистки, %	Рекомендуемые технологии
$\Delta C_i \le 30$	1 Контролируемое снижение избытка воздуха 2 Нестехиометрическое сжигание 3 Упрощенное двухступенчатое сжигание без реконструкции 4 Рециркуляция дымовых газов
$30 < \Delta C_i \le 50$	1 Нестехиометрическое сжигание 2 Двухступенчатое сжигание с реконструкцией (для установок с 1982 года ввода)/без реконструкции (для установок до 1982 года ввода) 3 Рециркуляция дымовых газов 4 СНКВ 5 Нестехиометрическое сжигание + рециркуляция (для установок с 1982 года ввода) 6 Двухступенчатое сжигание + рециркуляция 7 Малотоксичные горелки (для установок с 1982 года ввода)
$50 < \Delta C_i \le 70$	1 Нестехиометрическое сжигание + СНКВ (для установок с 1982 года ввода) 2 Двухступенчатое сжигание + рециркуляция 3 Рециркуляция дымовых газов + СНКВ 4 Малотоксичные горелки (для установок с 1982 года ввода)
$\Delta C_i > 70$ (для установок с 1982 года ввода)	1 Двухступенчатое сжигание + рециркуляция 2 Малотоксичные горелки + рециркуляция 3 Малотоксичные горелки + СНКВ 4 Малотоксичные горелки + двухступенчатое сжигание

Таблица 2 — Перечень рекомендуемых наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов оксидов азота при сжигании твердого топлива

Необходимая степень очистки, %	Рекомендуемые технологии
$\Delta C_i \le 30$	1 Контролируемое снижение избытка воздуха 2 Нестехиометрическое сжигание 3 Двухступенчатое сжигание без реконструкции/с реконструкцией (для установок с 1982 года ввода) 4 Концентрическое сжигание
$30 < \Delta C_i \le 50$	1 Двухступенчатое сжигание без реконструкции/с реконструкцией 2 Упрощенное трехступенчатое сжигание 3 Малотоксичные горелки (для установок с 1982 года ввода) 4 СНКВ
$50 < \Delta C_i \le 70$	1 Малотоксичные горелки (для установок с 1982 года ввода) 2 Трехступенчатое сжигание 3 Нестехиометрическое сжигание + СНКВ
$\Delta C_i \le 70$ (для установок с 1982 года ввода)	1 Малотоксичные горелки 2 Малотоксичные горелки + СНКВ

Таблица 3 — Перечень рекомендуемых технологий для снижения выбросов оксидов серы при сжигании твердого топлива

Необходимая степень очистки, %	Рекомендуемые технологии
$\Delta C_i \le 40$	1 Скруббер Вентури с использованием щелочных свойств золы (при его наличии) 2 Упрощенная мокро-сухая сероочистка (метод *E*-SO_x) (перед ЭФ)
$40 < \Delta C_i \le 60$	1 Скруббер Вентури с использованием двойного щелочного способа (при его наличии) 2 Упрощенная мокро-сухая сероочистка (метод *E*-SO_x) (перед ЭФ) 3 Полусухая сероочистка с циркулирующей инертной массой (метод NID) (для установок с 1982 года ввода)
$60 < \Delta C_i \le 80$ (для установок с 1982 года ввода)	1 Полусухая сероочистка с циркулирующей инертной массой (метод NID)
$\Delta C_i > 80$ (для установок с 1982 года ввода)	1 Полусухая сероочистка с циркулирующей инертной массой (метод NID) 2 Аммиачно-сульфатная сероочистка

Таблица 4 — Перечень рекомендуемых наилучших доступных и перспективных технологий для снижения выбросов золы при сжигании твердого топлива

Необходимая степень очистки, %	Рекомендуемые технологии
$\Delta C_i \le 10$	1 Ремонт и наладка ЗУ
$10 < \Delta C_i \le 30$	1 Для батарейных циклонов: - замена на эмульгатор/скруббер 2 Для скрубберов/эмульгаторов: - установка эмульгатора в корпусе скруббера 3 Для электрофильтров: - оптимизация работы (влажностное или химическое кондиционирование); - модернизация ЭФ (установка современных электродов и вспомогательного оборудования)
$\Delta C_i > 30$	1 Для батарейных циклонов: - замена на эмульгатор, РФ или ЭФ; - установка скруббера или эмульгатора после батарейного циклона 2 Для скрубберов/эмульгаторов: - замена скруббера на эмульгатор; - замена на РФ или ЭФ 3 Для электрофильтров: - модернизация ЭФ (увеличение количества полей, увеличение высоты электрофильтра); - установка современных ЭФ или РФ

5.5 При окончательном выборе наилучших доступных или перспективных технологий для снижения выбросов энергетических установок необходимо учитывать:

- конструктивные особенности котельной установки, включая установленное пыле-, газоочистное оборудование;
- возможность уменьшения капитальных затрат за счет применения очистного оборудования для снижения выбросов сразу нескольких ЗВ (например, в мокрых скрубберах можно не только улавливать летучую золу, но и за счет использования щелочных свойств золы и раствора гашенной извести снижать выбросы SO_2);
- возможность внедрения нескольких НДТ на одной энергетической установке без снижения надежности и эффективности ее работы (например, мокрая сероочистка перед рукавным фильтром не может быть внедрена на одной энергетической установке без снижения ее надежности).

6 Алгоритм расчета затрат на снижение выбросов загрязняющих веществ для энергетической отрасли

6.1 Оценку затрат на снижение выбросов ЗВ при переходе на НДТ энергетической отрасли проводят в соответствии с алгоритмом, приведенном на рисунке 3.

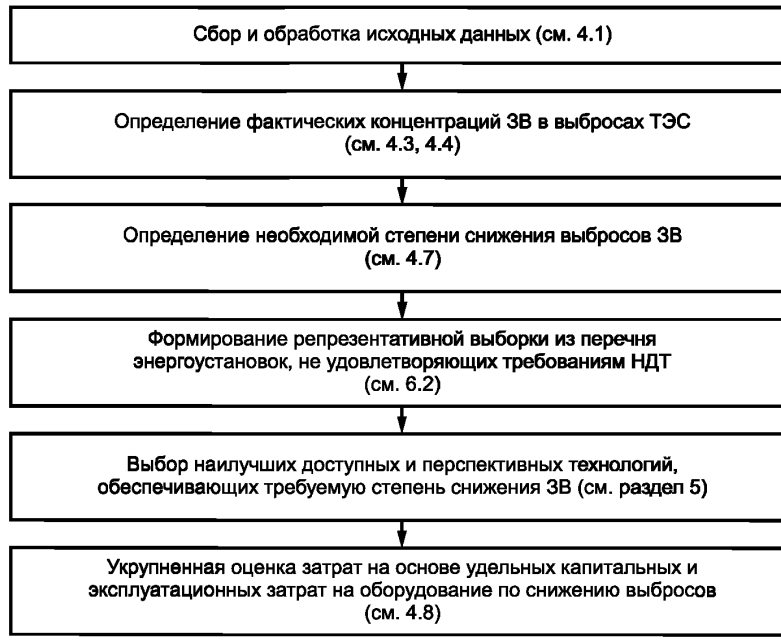


Рисунок 3 — Алгоритм оценки затрат при переходе на НДТ энергетической отрасли

6.2 Для формирования репрезентативной выборки из перечня энергоустановок, не удовлетворяющих требованиям НДТ, необходимо использовать метод стратифицированного семплирования. Данный метод предусматривает выделение типических групп (страт) исходя из следующих критериев:

- вид сжигаемого топлива;
- сроки ввода энергетического оборудования в эксплуатацию;
- необходимая степень снижения выбросов.

6.3 На основании критериев, приведенных в 6.2, все энергоустановки, не удовлетворяющие требованиям НДТ, разбивают на страты в следующей последовательности (рисунок 4):

- выделяют главные группы по виду сжигаемого топлива (газообразное или твердое топливо);
- внутри каждой выделенной главной группы выделяют группы по срокам ввода энергетического оборудования в эксплуатацию (до 1982 года или после 1982 года);

- далее каждую группу разбивают на подгруппы на основании вида загрязняющего вещества, по которому имеется превышение выброса сверх технологического показателя;
- в каждой такой подгруппе выделяют исследуемые страты на основании необходимой степени очистки для каждого загрязняющего вещества.

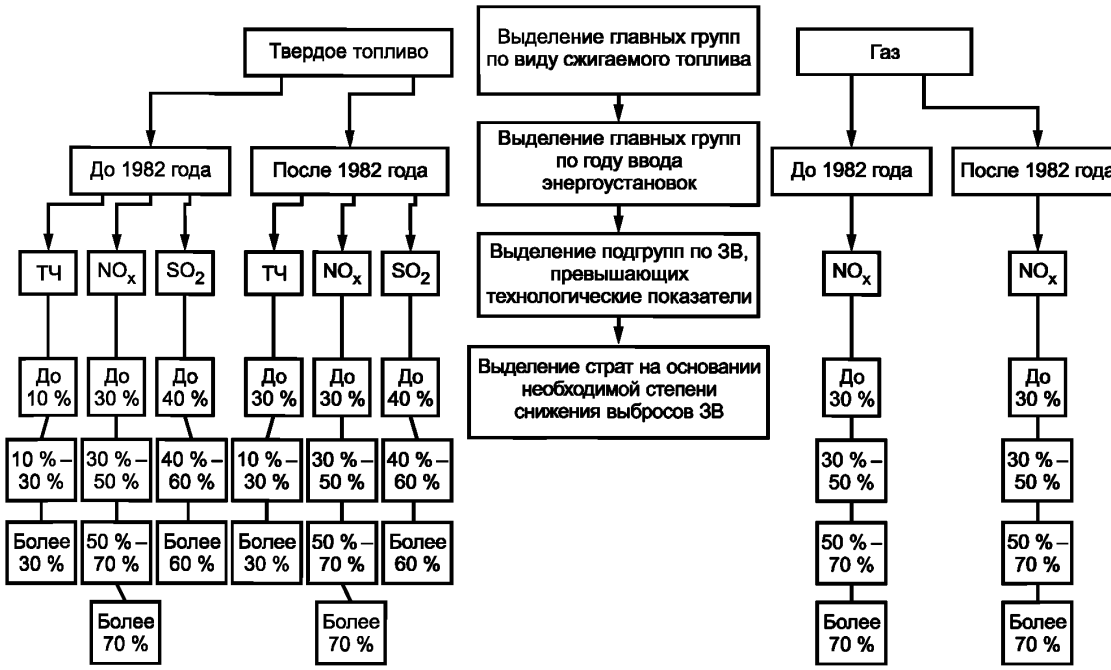


Рисунок 4 — Алгоритм разбиения исследуемого массива данных на страты

6.4 Объем репрезентативной выборки для каждой выделенной типической группы (страты) $n_{i\ р.в}$ вычисляют по формуле

$$n_{i\ р.в} = \frac{k^2 \cdot \overline{\sigma}^2 \cdot N_i}{k^2 \cdot \overline{\sigma}^2 + \Delta_x^2 \cdot N}, \quad (5)$$

где k — коэффициент доверия при выбранном уровне доверительной вероятности (рекомендуется принимать значение данного коэффициента k = 1,96, соответствующее 95 % уровню доверительной вероятности);

$\overline{\sigma}^2$ — средняя дисперсия подгруппы;

N_i — объем рассматриваемой страты;

Δ_x — предельная ошибка выборки;

N — объем подгруппы, в которую входит рассматриваемая страта.

Расчет средней дисперсии подгруппы осуществляют по формуле

$$\overline{\sigma}^2 = \frac{\sum \sigma_i^2 \cdot N_i}{N}, \quad (6)$$

где σ_i^2 — дисперсия i-й страты, вычисляемая по формуле

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum \left(x_{ij} - \overline{x_i}\right)^2}{N_i - 1}, \quad (7)$$

где x_{ij} — значение степени снижения выбросов ЗВ j-й энергоустановки i-й страты;

$\overline{x_i}$ — среднее значение степени снижения выбросов ЗВ i-й страты.

Расчет предельной ошибки выборки Δ_{xi} для i-й страты определяют по формуле

$$\Delta_{\bar{x}i} = \mu_{\bar{x}i} \cdot k, \quad (8)$$

где $\mu_{\bar{x}i}$ — средняя ошибка типической выборки для бесповторного отбора.

Среднюю ошибку типической выборки для бесповторного отбора $\mu_{\bar{x}i}$ вычисляют по формуле (9) в случае, если количество страт $i > 1$, и по формуле (10) для случая, когда в подгруппе всего одна страта ($i = 1$).

$$\mu_{\bar{x}i} = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}^2}{N_i - 1}\left(1 - \frac{N_i}{N}\right)}; \quad (9)$$

$$\mu_{\bar{x}i} = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}^2}{N_i - 1}}. \quad (10)$$

Пример расчета объема репрезентативной выборки приведен в приложении В.

6.5 Расчет затрат на оборудование по снижению выбросов для энергоустановок, включенных в репрезентативные выборки, проводят в следующем порядке:

- для каждой энергоустановки определяют затраты на оборудование в соответствии с 4.8;
- определяют суммарные затраты для репрезентативной выборки $З_{сум.\ р.в}$ путем сложения затрат по выбранным энергоустановкам, входящим в рассматриваемую выборку.

6.6 Укрупненную оценку затрат на оборудование по снижению выбросов $З_в$ при переходе на НДТ энергетической отрасли вычисляют по формуле

$$З_в = \sum_m \sum_i \frac{З_{сум.\ р.в} \cdot N_i}{n_{i\ р.в}}, \quad (11)$$

где m — число подгрупп в исходном массиве данных;

$З_{сум.р.в}$ — затраты на оборудование по снижению выбросов для всех энергоустановок, входящих в репрезентативную выборку.

Приложение А
(обязательное)

Расчет содержания загрязняющих веществ в выбросах энергетической установки

А.1 Расчет концентраций оксидов азота в выбросах энергетической установки

А.1.1 Расчет концентраций оксидов азота для энергетических установок, сжигающих твердое топливо

А.1.1.1 Исходными данными для расчета являются:

A^r — зольность топлива, % на рабочую массу;

W^r — влажность топлива, % на рабочую массу;

N^r — содержание азота в топливе, % на рабочую массу;

Q_i^r — теплота сгорания топлива, МДж/кг;

V^{daf} — выход летучих на горючую массу, %;

$\alpha_г$ — коэффициент избытка воздуха в горелках;

α_1 — доля первичного воздуха по отношению к теоретически необходимому;

R — степень рециркуляции дымовых газов через горелки, %;

$\frac{w_2}{w_1}$ — отношение скорости вторичного воздуха на выходе из внутреннего канала (ближайшего к первичному) к скорости первичного воздуха;

$\Delta\alpha_3$ — доля третичного воздуха, подаваемого в топку помимо горелок;

$\Delta\alpha_{сбр}$ — доля сбросного воздуха (сушильный агент) при транспорте пыли к горелкам горячим воздухом;

$T''_{ЗАГ}$ — температура на выходе из ЗАГ, К;

$B_р$ — расчетный расход топлива, кг/ч.

тип горелок (вихревые, прямоточные, с подачей пыли высокой концентрации);

А.1.1.2 Массовую концентрацию оксидов азота NO_x, рассчитанную для стандартных условий в сухих дымовых газах при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха в дымовых газах α = 1,4, г/м^3, вычисляют по формуле

$$C_{NO_x} = \frac{K_{NO_2} \cdot Q_i^r}{V_{сг}}, \quad (А.1)$$

где K_{NO_2} — удельные выбросы оксидов азота в пересчете на диоксид азота NO_2, г/МДж.

$V_{сг}$ — объем сухих дымовых газов при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха в дымовых газах α = 1,4; м^3/кг твердого топлива, вычисляемый по формуле

$$V_{сг} = V_г^0 - V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_в^0, \quad (А.2)$$

где $V_г^0$ — теоретический объем дымовых газов, м^3/кг (м^3/м^3);

$V_{H_2O}^0$ — теоретический объем водяных паров, м^3/кг (м^3/м^3);

α = 1,4 — коэффициент избытка воздуха в дымовых газах;

$V_в^0$ — теоретический объем воздуха, м^3/кг (м^3/м^3).

Определение $V_в^0$, $V_г^0$, $V_{H_2O}^0$ проводят по справочным данным или по химическому составу сжигаемого топлива с использованием формул (А.3)—(А.5) для твердого топлива

$$V_в^0 = 0{,}0889 \cdot (C^r + 0{,}375 \cdot S_{ор+к}^r) + 0{,}265 \cdot H^r - 0{,}03 \cdot O^r; \quad (А.3)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0{,}111 \cdot H^r + 0{,}012 \cdot W^r + 0{,}0161 \cdot V^0; \quad (А.4)$$

$$V_г^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = 1{,}866\frac{C^r + 0{,}375 \cdot S_{ор+к}^r}{100} + 0{,}79 \cdot V^0 + 0{,}8\frac{N^r}{100} + V_{H_2O}^0, \quad (А.5)$$

где C^r, $S_{ор+к}^r$, H^r, O^r, N^r — соответственно содержание углерода, серы (органической и колчеданной), водорода, кислорода и азота в рабочей массе топлива, % по массе;

V_{RO_2} — объем трехатомных газов ($RO_2 = CO_2 + SO_2$).

Удельный выброс оксида азота K_{NO_2} вычисляют по формуле

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{тпл} + K_{NO_2}^{взд}, \quad (А.6)$$

где $K_{NO_2}^{тпл}$ — удельные выбросы топливных оксидов азота, г/МДж;

$K_{NO_2}^{взд}$ — удельные выбросы воздушных оксидов азота, г/МДж.

При этом удельные выбросы топливных оксидов азота $K_{NO_2}^{тпл}$ рассчитывают по формуле

$$K_{NO_2}^{тпл} = 0,12 \cdot \xi_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_г} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_\vartheta \cdot \beta_{см}, \quad (A.7)$$

где ξ_{NO_x} — безразмерный коэффициент, учитывающий характеристики топлива, вычисляемый по формуле

$$\xi_{NO_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d), \quad (A.8)$$

где N^d — содержание азота в сухой массе топлива, %;

FR — топливный коэффициент, %, вычисляемый по формуле

$$FR = \frac{C^{св}}{V^r}, \quad (A.9)$$

где V^r — выход летучих на рабочую массу, %;

$C^{св}$ — связанный углерод, %, вычисляемый по формуле

$$C^{св} = 100 - W^r - A^r - V^r. \quad (A.10)$$

Значения других коэффициентов из формулы (А.7) приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Значения коэффициентов

Фактор, который учитывается коэффициентом	Зависимость	Диапазон пригодности зависимости
Влияние коэффициента избытка воздуха в вихревой горелке $\beta_{\alpha г}^{вхр}$	$(0,35 \cdot \alpha_г + 0,4)^2$	$0,9 \le \alpha_г \le 1,3$
Влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке $\beta_{\alpha г}$	$(0,53 \cdot \alpha_г + 0,12)^2$	$0,9 \le \alpha_г \le 1,3$
Влияние доли первичного воздуха в горелке β_{α_1}	$1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$	$0,15 \le \alpha_1 \le 0,55$
Влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух (без учета снижения температуры в ЗАГ) β_R	$1 - 0,016\sqrt{R}$	$0 \le R \le 30$ %
Влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота β_ϑ	$0,11 \cdot \sqrt[3]{T''_{ЗАГ} - 1100}$	1250 K $\le T''_{ЗАГ} \le$ 2050 K
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\beta_{см}^{вхр}$	$0,4 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 + 0,32$	$1,0 \le \frac{w_2}{w_1} \le 1,6$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\beta_{см}^{прм}$	$0,98 \cdot \frac{w_2}{w_1} - 0,47$	$1,4 \le \frac{w_2}{w_1} \le 4,0$

При подаче в горелки пыли высокой концентрации значение $K_{NO_2}^{тпл}$, рассчитанное по формуле (А.7), умножают на коэффициент 0,8. При этом долю первичного воздуха α_1 и $\frac{w_2}{w_1}$ принимают равными тем значениям, которые были бы выбраны при обычной подаче пыли к горелкам первичным воздухом.

Удельные выбросы воздушных оксидов азота $K_{NO_2}^{взд}$ вычисляют по формуле

$$K_{NO_2}^{взд} = \frac{1,54 \cdot 10^{16}}{\sqrt{T''_{ЗАГ}}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha''_{ЗАГ} - 1}{\alpha''_{ЗАГ}}} \cdot e^{\left(-\frac{67000}{T''_{ЗАГ}}\right)}, \quad (A.11)$$

где $\alpha''_{ЗАГ}$ — коэффициент избытка воздуха в ЗАГ, условно принимаемый как сумма организованно подаваемого воздуха через горелки $\alpha_г$ и присосов через нижнюю часть топочной камеры $\Delta\alpha_т$, вычисляемый по формуле

$$\alpha''_{ЗАГ} = \alpha_г + \frac{1}{2} \cdot \Delta\alpha_т. \quad (A.12)$$

Формула (А.11) справедлива в диапазонах коэффициентов избытка воздуха и температуры в ЗАГ соответственно $1,05 \le \alpha''_{ЗАГ} \le 1,4$ и $1800 \le T''_{ЗАГ} \le 2050$ K. При $T''_{ЗАГ} < 1800$ K значением $K_{NO_2}^{взд}$ можно пренебречь.

В отсутствие рециркуляции дымовых газов в горелке температуру на выходе из ЗАГ $\vartheta''_{ЗАГ}$, °С, вычисляют методом последовательных приближений в соответствии с [2] по формуле

$$\vartheta''_{ЗАГ} = \frac{\frac{100}{100 - q_4} \cdot \beta_{сг}^{ЗАГ} \cdot Q_i^r \cdot Q_в + i_{тл}}{(V_C)_Г} - \frac{2,05 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon_т \cdot \left(T''_{ЗАГ}\right)^4 \psi F}{B_р \cdot (V_C)_Г}, \quad (A.13)$$

где q_4 — потери тепла от механической неполноты сгорания топлива (принимаются по тепловому расчету котла [3]), %,

для чего предварительно задается значение $T''_{ЗАГ} = \vartheta''_{ЗАГ} + 273$, которое входит в правую часть. Если расчетное значение $\vartheta''_{ЗАГ}$, вычисленное по формуле (А.13), будет более чем на 50 °С отличаться от предварительно выбранной величины ($\vartheta''_{ЗАГ}$), то необходимо сделать второе приближение.

В формуле (А.13):

$Q_в$ — теплосодержание воздуха, поступающего через горелки, МДж/кг;

$(V_C)_Г$ — средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, МДж/(кг ·°С);

$\beta_{сг}^{ЗАГ}$ — степень выгорания топлива в ЗАГ;

$i_{тл}$ — удельная энтальпия топлива, МДж/кг;

ψF — произведение коэффициента эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м^2;

$\varepsilon_Т$ — степень черноты топки в зоне максимального тепловыделения, определяемая в соответствии с [3].

При наличии рециркуляции дымовых газов расчет $\vartheta''_{ЗАГ}$ следует выполнять в соответствии с руководящими указаниями по проектированию топок с твердым шлакоудалением.

А.1.2 Расчет концентраций оксидов азота для энергетических установок, сжигающих газообразное топливо

А.1.2.1 Исходными данными для расчета являются:

а) конструктивные параметры:

$a_Т$ — ширина топки (в свету), м; при наличии двусветного экрана принимается ширина одной ячейки;

$b_Т$ — глубина топки (в свету), м;

$h_{яр}$ — расстояние между осями соседних (по высоте) горелок, м; при неравенстве расстояний между ярусами (при $Z_{яр} \geq 3$) определяют расстояния между первым и вторым ярусами горелок $h_{1,2}$, вторым и третьим $h_{2,3}$ и т. д.;

h_δ — расстояние между осью верхнего яруса горелок и осью сопел вторичного дутья (в случае двухступенчатого сжигания топлива);

тип горелок — унифицированные и оптимизированные:

- двухпоточные стадийного сжигания;
- многопоточные стадийного сжигания;
- многопоточные стадийного сжигания с подачей части топлива в инертные газы;

$D_а$— диаметр амбразуры горелок, м;

$n_Г$ — количество горелок;

$Z_э$ — число двусветных экранов;

б) характеристики топлива:

Q_i^r — теплота сгорания топлива, МДж/м^3;

$V_в^0$ — теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания топлива при α = 1,0 м^3/м^3;

$V_г^0$ — объем продуктов сгорания, образовавшихся при стехиометрическом (α = 1,0) сжигании топлива, м^3/м^3;

V_{RO_1} — объем трехатомных газов, полученных при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м^3/м^3;

$V_{N_2}^0$ — теоретический объем азота, полученный при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, м^3/м^3;

в) режимные параметры:

$B_р$ — расчетный расход топлива, м^3/с, при наличии двусветного экрана $B_р$ принимают на одну ячейку;

$T_{гв}$ — температура горячего воздуха, °С;

$\alpha_Г$ — коэффициент избытка воздуха в горелке;

$\Delta\alpha_Т$ — присосы холодного воздуха в топку;

R — доля рециркуляции дымовых газов в зону активного горения (0—0,35);

$\alpha_{отб}$ — коэффициент избытка воздуха в месте отбора дымовых газов на рециркуляцию;

$t_{гр}$ — температура газов в месте отбора на рециркуляцию, °С;

δ — доля воздуха, поступающего во вторую ступень горения при двухступенчатом сжигании (0—0,35).

А.1.2.2 Массовую концентрацию оксидов азота (в пересчете на NO_2), рассчитанную для стандартных условий в сухих дымовых газах при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха $\alpha_г$ = 1,4), $C_{NO_2}^{ст.у}$, г/м^3, вычисляют по формуле

$$C_{NO_2}^{ст.у} = C_{NO_2}^{М} \cdot \frac{V_г^R}{\left[V_{сг}^0 + (1{,}4-1)\cdot V_в^0\right]\cdot(1+R)}, \qquad (А.14)$$

где $C_{NO_2}^{М}$ — массовая концентрация оксидов азота (в пересчете на NO_2) во влажных продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха в ЗАГ, г/м^3;

$V_г^R$ — объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газообразного топлива при вводе в ЗАГ газов рециркуляции, м^3/м^3;

R — доля рециркуляции дымовых газов в зону активного горения (0—0,35);

$V_{сг}^0$ — теоретический объем сухих дымовых газов при коэффициенте избытка воздуха α = 1,4 по формуле (А.2), м^3/м^3.

Определение $V_в^0$, $V_г^0$, $V_{H_2O}^0$ осуществляют по справочным данным или по химическому составу сжигаемого топлива с использованием формул (А.15)—(А.17) для газообразного топлива:

$$V^0 = 0{,}0476 \cdot [0{,}5 \cdot CO + 0{,}5 \cdot H_2 + 1{,}5 \cdot H_2S + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot C_mH_n - O_2]; \quad (А.15)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0{,}01 \cdot [H_2S + H_2 + \sum\frac{n}{2} \cdot C_mH_n + 0{,}124 \cdot d_{гт}] + 0{,}0161 \cdot V^0; \quad (А.16)$$

$$V_г^0 = 0{,}01 \cdot [CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot C_mH_n] + 0{,}79 \cdot V^0 + \frac{N_2}{100} + V^0{}_{H_2O}; \quad (А.17)$$

где CO, CO_2, H_2, H_2S, C_mH_n, N_2, O_2 — соответственно содержание оксида углерода, диоксида углерода, водорода, сероводорода, углеводородов, азота и кислорода в исходном топливе, % по объему;

m и n — число атомов углерода и водорода, соответственно;

$d_{гт}$ — влагосодержание газообразного топлива, г/м^3.

Массовую концентрацию оксидов азота (в пересчете на NO_2) во влажных продуктах сгорания $C_{NO_2}^M$ при коэффициенте избытка воздуха в зоне активного горения, г/м^3, для нормальных условий (0 °С, 101,3 кПа или 760 мм рт. ст.) вычисляют по формуле

$$C_{NO_2}^M = 2{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot K_г \cdot \left[26 \cdot e^{\left(0{,}26 \cdot \frac{\overline{T}_{ЗАГ} - 1700}{100}\right)} - 4{,}7\right] \cdot \left[e^{\left(q_{ЗАГ}^{отр}\right)} - 1\right] \times$$

$$\times [13 - 79{,}8 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1{,}07)^4 + 18{,}1 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1{,}07)^3 + 59{,}4 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1{,}07)^2 + \quad (А.18$$

$$+ 9{,}6 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - 1{,}07)] \cdot \tau_{ЗАГ},$$

где $\overline{T}_{ЗАГ}$ — среднеинтегральная температура продуктов сгорания в ЗАГ, К;

$q_{ЗАГ}^{отр}$ — отраженный тепловой поток в ЗАГ, МВт/м^2;

$\alpha_{ЗАГ}$ — коэффициент избытка воздуха в ЗАГ;

$\tau_{ЗАГ}$ — время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ, с;

$K_г$ — коэффициент, учитывающий конструкцию горелочного устройства, определяемый по таблице А.2.

Таблица А.2 — Значения коэффициента $K_г$ в зависимости от конструкции горелочного устройства при сжигании газообразного топлива

Место ввода газов рециркуляции	Значение $K_г$
Унифицированные и оптимизированные горелки	1,0
Двухпоточные горелки стадийного сжигания	0,75
Многопоточные горелки стадийного сжигания	0,65
Многопоточные горелки стадийного сжигания с подачей части топлива в инертные газы	0,5

Среднеинтегральную температуру продуктов сгорания в ЗАГ $\overline{T}_{ЗАГ}$ вычисляют по формуле

$$\overline{T}_{ЗАГ} = T_{ад} \cdot (1 - \psi_{ЗАГ})^{0{,}25}, \quad (А.19)$$

где $T_{ад}$ — адиабатная температура горения топлива, К;

$\psi_{ЗАГ}$ — средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ.

Адиабатную температуру горения $T_{ад}$ вычисляют методом последовательных приближений по формуле

$$T_{ад} = [\beta_{сг} \cdot Q_i^r + \alpha_г \cdot I^0_{гв} + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_т \cdot I^0_{хв} + Q_{гр}]/[\beta_{сг} \cdot V_г^0 \cdot c_г + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) \cdot V_в{}^0 \cdot c_в +$$

$$+ K_R \cdot R \cdot (V_г^0 \cdot c_г + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{отб} - 1) \cdot V_в{}^0 \cdot c_в)] + 273, \quad (А.20)$$

где $\beta_{сг}$ — степень выгорания топлива в ЗАГ, определяемая по таблице А.3 в зависимости от вида сжигаемого топлива.

Таблица А.3 — Зависимость степени выгорания топлива $\beta_{сг}$ от коэффициента избытка воздуха в ЗАГ

Топливо	Зависимость степени выгорания топлива $\beta_{сг}$ от коэффициента избытка воздуха в ЗАГ												
	0,7	0,8	0,9	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	≥1,09
Газ	0,609	0,696	0,783	0,87	0,88	0,9	0,915	0,93	0,95	0,965	0,98	0,98	0,98

Q_i^r — теплота сгорания топлива, МДж/м^3;

$\alpha_г$ — избыток воздуха в горелке;

$I^0_{гв}$ — энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при температуре горячего воздуха, МДж/м^3;

$I^0_{хв}$ — энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при температуре холодного воздуха, МДж/м^3;

$Q_{гр}$ — теплота, вносимая в зону активного горения с газами рециркуляции, МДж/м^3;

$V^0_в$ и $V^0_г$ — теоретические объемы воздуха и продуктов сгорания, м^3/м^3;

$c_г$ — средняя теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(м^3·°С);

$c_в$ — теплоемкость воздуха при температуре горячего воздуха, МДж/(м^3 · °С);

K_R — коэффициент, зависящий от способа ввода газов рециркуляции, определяемый по таблице А.4.

Таблица А.4 — Значения коэффициента K_R в зависимости от способа ввода газов рециркуляции в ЗАГ

Способ ввода газов рециркуляции	K_R
В под топки	0,05
В шлицы под горелки	0,15
Снаружи воздушного потока горелки	0,85
В дутьевой воздух	1,0
Между воздушными потоками горелки	1,2

R — доля рециркуляции дымовых газов в зону активного горения (0—0,35);

$\alpha_{отб}$ — коэффициент избытка воздуха в месте отбора газов из конвективного газохода на рециркуляцию.

Теплоту, вносимую в зону активного горения с газами рециркуляции $Q_{гр}$, вычисляют по формуле

$$Q_{гр} = K_R \cdot R \cdot I_{гр}, \quad (А.21)$$

где $I_{гр}$ — энтальпия газов рециркуляции, подаваемых в ЗАГ, МДж/кг (МДж/м^3), вычисляемая по формуле

$$I_{гр} = I^0_{гр} + (\alpha_{отб} - 1) \cdot I^0_в, \quad (А.22)$$

где $I^0_{гр}$ — энтальпия газов рециркуляции при температуре газов рециркуляции МДж/кг (МДж/м^3), рассчитываемая в соответствии с тепловым расчетом котельных агрегатов по [3].

Коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения $\alpha_{ЗАГ}$ вычисляют по формуле

$$\alpha_{ЗАГ} = \alpha_т + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_т. \quad (А.23)$$

Среднюю теплоемкость продуктов сгорания при сжигании природного газа $c_г$ вычисляют по формуле

$$c_г = (1{,}57 + 0{,}134 \cdot k_t) \cdot 10^{-3}, \quad (А.24)$$

где $k_t = \dfrac{\vartheta_{ад} - 1200}{1000}$ — температурный коэффициент изменения теплоемкости;

$\vartheta_{ад}$ — ожидаемая адиабатная температура, °С.

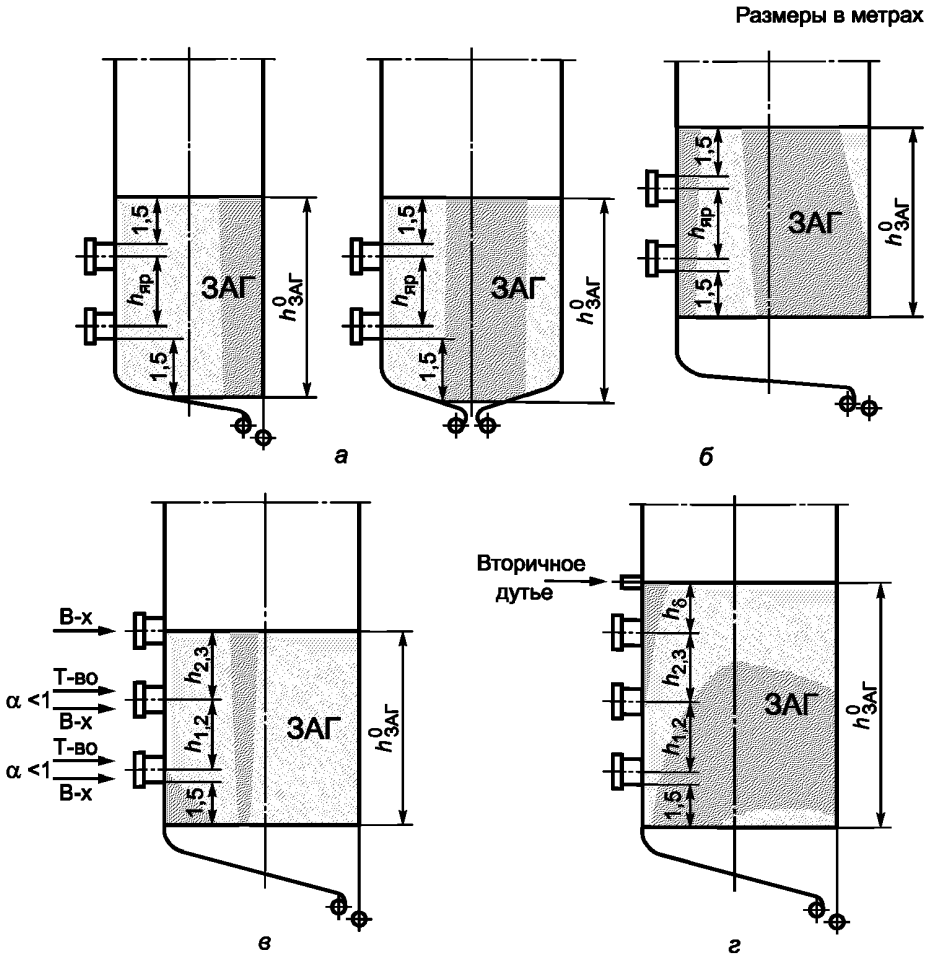
Теплоемкость воздуха при температуре горячего воздуха $c_в$ вычисляют по формуле

$$c_в = (1{,}46 + 0{,}092 \cdot k_t) \cdot 10^{-3}. \quad (А.25)$$

Средний коэффициент тепловой эффективности поверхностей нагрева, ограничивающих ЗАГ $\Psi_{ЗАГ}$, вычисляют по формуле

$$\Psi_{ЗАГ} = \frac{\sum\left(\psi_i \cdot F_{ст_i}\right) + \psi' \cdot F_{верх} + \psi'' \cdot F_{ниж}}{F_{ст} + F_{верх} + F_{ниж}}, \quad (А.26)$$

где $F_{ст}$, $F_{верх}$, $F_{ниж}$ — соответственно полная поверхность экранированных стен ЗАГ, площадь поперечного сечения топки, ограничивающего ЗАГ сверху и снизу, м^2 (рисунок А.1).



В-х — воздух; Т-во — топливо

Рисунок А.1 — Схемы определения зоны активного горения при различных вариантах ввода топлива и воздуха в топку

$h^0_{ЗАГ}$ — высота зоны активного горения без учета ввода в нее газов рециркуляции и влаги, м;

$F_{ст_i}$, Ψ_i — площадь i-го участка стены ЗАГ, м^2, и тепловая эффективность этого участка;

Ψ' — коэффициент, характеризующий отдачу теплоты излучением в вышерасположенную зону (для топок, работающих на газе, $\Psi' = 0{,}1$).

Коэффициент Ψ'' характеризует отдачу теплоты в сторону пода топки:

- если под не включен в объем ЗАГ:

$$\Psi'' = \frac{F^н_ф \cdot \psi_ф + 2 \cdot F^н_б \cdot \psi_б + F^н_з \cdot \psi_з + F^н_п \cdot \psi_п}{F^н_ф + 2 \cdot F^н_б + F^н_з + F^н_п}, \quad (А.27)$$

где $F^н_ф$, $F^н_б$, $F^н_з$, $F^н_п$ — соответственно площади фронтового, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода, м^2;

$\Psi_ф$, $\Psi_б$, $\Psi_з$, $\Psi_п$ — соответственно тепловая эффективность фронтового, боковых и заднего экранов, расположенных ниже ЗАГ, и пода;

- если под включен в объем ЗАГ:

$$\Psi'' = \Psi_п. \quad (А.28)$$

Отраженный поток в зоне активного горения $q^{отр}_{ЗАГ}$, МВт/м^2, вычисляют по формуле

$$q^{отр}_{ЗАГ} = q_{ЗАГ} \cdot (1 - \Psi_{ЗАГ}), \quad (А.29)$$

где $q_{ЗАГ}$ — теплонапряжение зоны активного горения, МВт/м^2, вычисляемое по формуле

$$q_{ЗАГ} = \frac{B_р \cdot \left(\beta_{сг} \cdot Q_i^r + Q_в + Q_{гр}\right)}{f_{ЗАГ}}, \quad (А.30)$$

где $B_р$ — расчетный расход топлива, м^3/с (при наличии в топке двусветного экрана $B_р$ принимается на одну ячейку);

$Q_в$ — теплота, вносимая в зону активного горения с воздухом, МДж/м^3, вычисляемая по формуле

$$Q_в = \alpha_г \cdot I_в^0 + 0{,}5 \cdot \Delta\alpha_т \cdot I_{хв}^0; \quad (А.31)$$

$f_{ЗАГ}$ — полная поверхность зоны активного горения, м^2, вычисляемая по формуле

$$f_{ЗАГ} = 2 \cdot a_т \cdot b_т + 2 \cdot (a_т + b_т) \cdot h_{ЗАГ}, \quad (А.32)$$

где $a_т$, $b_т$ — ширина фронта и глубина топочной камеры, м (при наличии в топке двусветных экранов ширина одной ячейки принимается равной $a_т^я = \frac{a_т}{(Z_э + 1)}$, где $Z_э$ — число двусветных экранов);

$h_{ЗАГ}$ — высота зоны активного горения, м, вычисляемая по формуле

$$h_{ЗАГ} = h_{ЗАГ}^0 \cdot \frac{V_г^R}{V_г}, \quad (А.33)$$

где $h_{ЗАГ}^0$ — высота зоны активного горения без учета ввода в нее газов рециркуляции и влаги, м;

$V_г^R$ — объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газообразного топлива при вводе в ЗАГ газов рециркуляции, м^3/м^3;

$V_г$ — объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газообразного топлива в ЗАГ, м^3/м^3.

При настенной компоновке горелок высоту $h_{ЗАГ}^0$ вычисляют из геометрических характеристик топки по формуле (А.34) — при обычном сжигании и по формуле (А.35) — при ступенчатом сжигании

$$h_{ЗАГ}^0 = \sum_{i=1}^{n} h_{яр_i} + D_a + 3\ ; \quad (А.34)$$

$$h_{ЗАГ}^0 = \sum_{i=1}^{n} h_{яр_i} + h_б + 0{,}5 \cdot D_a + 1{,}5, \quad (А.35)$$

где $h_{яр_i}$ — расстояние между осями горелок по высоте между ярусами, м;

n — количество ярусов;

$h_б$ — расстояние между осями горелок верхнего яруса и сопел вторичного дутья, м;

D_a — диаметр амбразуры горелок, м.

Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газообразного топлива в ЗАГ, $V_г$, вычисляют по формуле

$$V_г = \beta_{сг} \cdot V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) \cdot V_в^0. \quad (А.36)$$

Объем продуктов сгорания, образовавшихся при сжигании 1 м^3 газообразного топлива в случае ввода в ЗАГ газов рециркуляции, $V_г^R$, вычисляют по формуле

$$V_г^R = \beta_{сг} \cdot V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{ЗАГ} - \beta_{сг}) \cdot V_в^0 + K_R \cdot R \cdot [V_г^0 + 1{,}0161 \cdot (\alpha_{отб} - 1) \cdot V_в^0]. \quad (А.37)$$

Время пребывания продуктов сгорания в зоне активного горения $\tau_{ЗАГ}$ вычисляют по формуле

$$\tau_{ЗАГ} = \frac{a_т \cdot b_т \cdot h_{ЗАГ}}{B_р \cdot V_г^{R,g} \cdot \left(\frac{\bar{T}_{ЗАГ}}{273}\right)} \cdot \xi, \quad (А.38)$$

где ξ — коэффициент заполнения топочной камеры восходящими потоками газов:

- при фронтальном расположении горелок $\xi = 0{,}75$;
- при встречном расположении горелок $\xi = 0{,}8$;
- при подовой компоновке $\xi = 0{,}9$.

А.2 Расчет концентраций твердых частиц в выбросах энергетической установки

Массовую концентрацию твердых частиц для стандартных условий (в сухих дымовых газах при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1{,}4$), г/м^3, вычисляют по формуле

$$C_{тв.\,ч} = \frac{M_{тв.\,ч}}{B_р \cdot V_{сг}}, \quad (А.39)$$

где $M_{тв.\,ч}$ — массовый расход твердых частиц (летучей золы и несгоревшего топлива), поступающих в атмосферу с дымовыми газами при работе котла на номинальной нагрузке, г/с;

$B_р$ — расчетный расход топлива на котел из теплового расчета котла, кг/с;

$V_{сг}$ — объем сухих дымовых газов при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха в дымовых газах α = 1,4; м^3/кг, рассчитанный по формуле (А.2).

Массовый расход твердых частиц (летучей золы и несгоревшего топлива) $М_{тв.\ ч}$, поступающих в атмосферу с дымовыми газами котлов, при наличии экспериментальных данных по содержанию горючих в уносе ($Г_{ун}$, %), вычисляют по формуле

$$М_{тв.\ ч} = B \cdot \frac{A^r}{100 - Г_{ун}} \cdot a_{ун} \cdot \left(1 - \eta_{зу}\right) \cdot 10^3, \quad (А.\ 40)$$

где B — полный расход топлива на номинальной нагрузке, кг/с;

A^r — зольность топлива на рабочую массу, %;

$Г_{ун}$ — содержание горючих в уносе, %;

$a_{ун}$ — доля золы, уносимой газами из котла (доля золы топлива в уносе); для котлов с твердым шлакоудалением (ТШУ) принимается равной 0,95, для котлов с жидким шлакоудалением (ЖШУ) — 0,85;

$\eta_{зу}$ — доля твердых частиц, улавливаемых в золоуловителях без учета влияния сероулавливающих установок.

При отсутствии экспериментальных данных о содержании горючих в уносе расчет проводят по формуле

$$М_{тв.\ ч} = 0{,}01 \cdot B \cdot \left(a_{ун} \cdot A^r + q_4 \cdot \frac{Q_i^r}{32{,}68}\right) \cdot \left(1 - \eta_{зу}\right) \cdot 10^3, \quad (А.\ 41)$$

где Q_i^r — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

32,68 — теплота сгорания углерода, МДж/кг.

Полный расход топлива B, кг/с, вычисляют по формуле

$$B = B_р \, / \left(1 - \frac{q_4}{100}\right). \quad (А.42)$$

А.3 Расчет концентраций оксидов серы SO_2 в выбросах энергетической установки

Массовую концентрацию оксидов серы SO_2 для стандартных условий (в сухих дымовых газах при нормальных условиях и коэффициенте избытка воздуха α = 1,4), г/м^3, вычисляют по формуле

$$C_{SO_2} = \frac{М_{SO_2}}{B_р \cdot V_{сг}}, \quad (А.43)$$

где $М_{SO_2}$ — массовый расход оксидов серы, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, г/с;

$V_{сг}$ — объем сухих дымовых газов, образующихся при полном сгорании 1 кг топлива, при стандартном коэффициенте избытка воздуха α = 1,4 м^3/кг топлива, рассчитанный по формуле (А.2);

$B_р$ — расчетный расход топлива из теплового расчета котла, г/с.

Массовый выброс оксидов серы $М_{SO_2}$, г/с, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами, вычисляют по формуле

$$М_{SO_2} = 20 \cdot B_р \cdot S^r \cdot \left(1 - \eta'_{SO_2}\right) \cdot \left(1 - \eta''_{SO_2}\right) \cdot \left(1 - \eta^c_{SO_2} \cdot \frac{n_o}{n_x}\right), \quad (А.44)$$

где S^r — содержание серы в топливе на рабочую массу, %;

η'_{SO_2} — доля оксидов серы, связываемых летучей золой в газоходах котла (см. таблицу А.5);

η''_{SO_2} — доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителях попутно с твердыми частицами;

$\eta^c_{SO_2}$ — доля оксидов серы, улавливаемых в сероулавливающей установке (при наличии);

n_o и n_x — длительность работы сероулавливающей установки и котла соответственно, ч/год.

Ориентировочные значения η'_{SO_2} при факельном сжигании различных видов топлива приведены в таблице А.5.

Таблица А.5 — Ориентировочные значения η'_{SO_2}

Топливо	η'_{SO_2}
Торф	0,15
Сланцы эстонские и ленинградские	0,8
Сланцы других месторождений	0,5
Экибастузский уголь	0,02

Окончание таблицы А.5

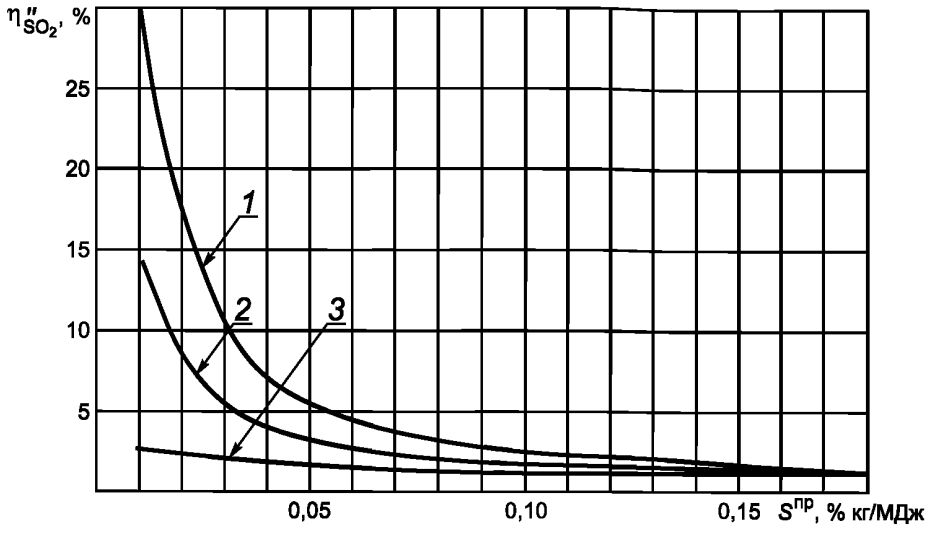
Топливо	η'_{SO_2}
Березовские угли Канско-Ачинского бассейна для топок: с твердым шлакоудалением с жидким шлакоудалением	 0,5 0,2
Другие угли Канско-Ачинского бассейна для топок: с твердым шлакоудалением с жидким шлакоудалением	 0,2 0,05
Угли других месторождений	0,1

Долю оксидов серы η''_{SO_2}, улавливаемых в сухих золоуловителях (электрофильтрах, батарейных циклонах, рукавных фильтрах), принимают равной нулю. В мокрых золоуловителях типа МС и МВ эта доля зависит от общей щелочности орошающей воды и от приведенной сернистости топлива $S^{пр}$:

$$S^{пр} = \frac{s^r}{Q_i^r}, \qquad (А.45)$$

где Q_i^r — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг.

При принятых на тепловых электростанциях удельных расходах воды на орошение золоуловителей 0,1—0,15 л/нм^3 η''_{SO_2} определяют по рисунку А.2.



Щелочность орошающей воды, мг-экв/л: *1* — 10,0; *2* — 5,0; *3* — 0

Рисунок А.2 — Степень улавливания оксидов серы в мокрых золоуловителях в зависимости от приведенной сернистости топлива и щелочности орошающей воды

Величину $\eta^c_{SO_2}$ принимают по паспортным данным установки сероочистки дымовых газов.

Приложение Б
(обязательное)

Капитальные и эксплуатационные затраты на НДТ

Б.1 Затраты на оборудование по снижению выбросов ЗВ для каждой энергетической установки $З_{сум}$, руб., вычисляют как сумму капитальных затрат $З_{кап}$ и эксплуатационных затрат $З_{эксп}$ по формуле (2). При этом справочные значения удельных капитальных и эксплуатационных затрат на оборудование по снижению выбросов выбирают по таблицам Б.1 и Б.2.

Таблица Б.1 — Капитальные и эксплуатационные затраты на НДТ для снижения выбросов оксидов азота NO_x

Мероприятие	Потенциальное сокращение, %	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	Эксплуатационные затраты, руб./кВт-ч
Контролируемое снижение избытка воздуха			
Газ	15—20	0	0
Уголь	10—20	0	0
Нестехиометрическое сжигание			
Газ	30—45	0	0
Уголь	20—35	0	0
Рециркуляция дымовых газов			
Рециркуляция при сжигании газа (степень рециркуляции R = 20 %)	40—60	20—70	0,006—0,012
Рециркуляция при сжигании угля (степень рециркуляции R = 10 %)	10—20	20—70	0,006—0,012
Двухступенчатое сжигание без реконструкции/с реконструкцией котла			
Двухступенчатое сжигание без реконструкции			
Газ	20—35	0	0
Уголь	15—20	0	0
Двухступенчатое сжигание с реконструкцией			
Газ	30—60	70—140	0
Уголь	20—45	70—140	0
Трехступенчатое сжигание			
Уголь	30—60	100—200	0,060—0,090
Концентрическое сжигание			
Уголь	20—50	60—200	0
Малотоксичные горелки			
Газ	30—60	100—250	0
Уголь	30—50	60—200	0
Методы восстановления NO_x—СНКВ			
СНКВ	30—70	900—1500	0,066—0,090

Таблица Б.2 — Капитальные и эксплуатационные затраты на НДТ для снижения выбросов твердых частиц

Мероприятие	Максимальная степень снижения выбросов, %	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	Эксплуатационные затраты, руб./кВт-ч
Электрофильтр			
Оптимизация работы ЭФ (режимные и технологические методы)	99,5	1080—2200	0,012—0,015

Окончание таблицы Б.2

Мероприятие	Максимальная степень снижения выбросов, %	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	Эксплуатационные затраты, руб./кВт-ч
Модернизация ЭФ (конструктивные методы)	99,75	1300—2700	0,015—0,018
Установка современных ЭФ	99,9	1600—2900	0,018—0,023
Рукавный фильтр			
Установка рукавного фильтра	99,5—99,99	1700—2800	0,096—0,138
Эмульгатор			
Установка эмульгатора в корпусе мокрого скруббера	96—98	320—540	0,009—0,013
Мокрый скруббер			
Мокрый скруббер с трубой Вентури	98,5	290—470	0,006—0,018

Таблица Б.3 — Капитальные и эксплуатационные затраты на НДТ для снижения выбросов оксидов серы SO_2

Мероприятие	Потенциальное сокращение, %	Удельные капитальные затраты, руб./кВт	Эксплуатационные затраты, руб./кВт-ч
Мокрые скрубберы Вентури			
Мокрый скруббер Вентури с использованием двойного щелочного способа (при наличии установленного скруббера для золоулавливания)	50	470—1200	0,009—0,027
Полусухая (мокро-сухая) сероочистка			
Упрощенная мокро-сухая (E-SO_x) Применима только в случае использования ЭФ или РФ в качестве золоуловителей	50—60	110—340	0,009—0,027
Метод NID с рециркуляцией инертной массы	80—90	900—1000	0,5—1,5
Мокрая сероочистка			
Аммиачно-сульфатная сероочистка	95—99,5	2100—3900	0,5—1,5

Приложение В
(справочное)

Пример расчета объема репрезентативной выборки

В.1 Массив исходных данных содержит 25 энергоустановок, не удовлетворяющих требованиям НДТ. Исходные данные представлены в таблицах В.1 и В.2.

Таблица В.1 — Исходные данные

Вид топлива	Твердое топливо		Газообразное топливо	
Год ввода в эксплуатацию	до 31.12.1981	с 01.01.1982	до 31.12.1981	с 01.01.1982
Количество энергоустановок, из них:	12	5	3	3
с превышением по SO_2	2	2	—	—
с превышением по NO_x	1	0	3	3
с превышением по твердым частицам	9	3	—	—

Таблица В.2 — Данные по необходимым степеням снижения выбросов твердых частиц для каждой энергетической установки, введенной в эксплуатацию до 31.12.1981 года

№ энергетической установки в страте (типической группе)	Необходимая степень снижения выбросов, %		
	страта до 10 %	страта 11 %—30 %	страта более 30 %
1	5	15	35
2	7	25	40
3	—	28	37
4	—	—	42

Необходимо определить объем репрезентативной выборки для страты с необходимой степенью снижения выбросов твердых частиц более 30 % при сжигании твердого топлива для энергоустановок, введенных в эксплуатацию до 31.12.1981 г.

1) Определяют дисперсию каждой страты по формуле (7):

Для степени снижения выбросов до 10 %:

$$\sigma_1^2 = \frac{(5-6)^2 + (7-6)^2}{2-1} = 2.$$

Для степени снижения выбросов от 10 % до 30 %:

$$\sigma_2^2 = \frac{(15-22{,}66)^2 + (25-22{,}66)^2 + (28-22{,}66)^2}{3-1} = 46{,}33.$$

Для степени снижения выбросов более 30 %:

$$\sigma_3^2 = \frac{(35-38{,}5)^2 + (40-38{,}5)^2 + (37-38{,}5)^2 + (42-38{,}5)^2}{4-1} = 9{,}66.$$

2) Проводят расчет средней дисперсии подгруппы по формуле (6):

$$\overline{\sigma}^2 = \frac{\sum \sigma_i^2 \cdot N_i}{N} = \frac{\left(\sigma_1^2 \cdot N_1 + \sigma_2^2 \cdot N_2 + \sigma_3^2 \cdot N_3\right)}{N} = \frac{(2 \cdot 2 + 46{,}33 \cdot 3 + 9{,}66 \cdot 4)}{9} = 20{,}18.$$

3) Вычисляют значение средней ошибки для анализируемой страты более 30 % по формуле (9):

$$\mu_{\overline{x}3} = \sqrt{\frac{20{,}18}{4-1}\left(1 - \frac{4}{9}\right)} = 1{,}93.$$

4) Вычисляют значение предельной ошибки выборки для страты более 30 % по формуле (8):

$$\Delta_{x3} = 1,93 \cdot 1,96 = 3,78.$$

5) Определяют объем репрезентативной выборки для анализируемой страты более 30 % по формуле (5):

$$n_{\text{Зр.в}} = \frac{k^2 \cdot \bar{\sigma}^2 \cdot N_i}{k^2 \cdot \bar{\sigma}^2 + \Delta_x^2 \cdot N} = \frac{1,96^2 \cdot 20,18 \cdot 4}{1,96^2 \cdot 20,18 + 3,78^2 \cdot 9} = 1,35 \approx 1.$$

Таким образом, для оценки энергоустановок с необходимой степенью снижения выбросов твердых частиц более 30 % при сжигании твердого топлива, введенных в эксплуатацию до 31.12.1981 г., необходима выборка, в которую входит одна типичная энергоустановка.

Библиография

[1] Постановление Правительства Российской Федерации от 28 сентября 2015 г. № 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий»

[2] Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов/Под редакцией Э.Х. Вербовецкого и Н.Г. Жмерика.—СПб, 1996

[3] Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). СПб.: ЦКТИ, 1998

УДК 502.3:621.311.23.006.354 ОКС 13.020

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, оценка затрат, энергетика, снижение выбросов, природоохранные технологии, тепловые электрические станции, атмосферный воздух

БЗ 4—2019/12

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 04.09.2019. Подписано в печать 18.09.2019. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,95.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru