



## ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### Оценка экологической и экономической эффективности установки для очистки и утилизации газовых выбросов теплогенераторов, работающих на природном газе

Ежов В. С., доктор техн. наук, Алифанов А. О., инж.

Юго-Западный государственный университет, Курск

Воронин А. А., Терентьев П. В., инженеры

ОАО «Квадра», Курск

Описаны конструкция и принцип действия шахтной мультиблочной установки для очистки и утилизации газовых выбросов теплогенераторов. Представлены результаты испытаний опытно-промышленной установки и оценки ее экологической эффективности. Выполнен приближенный расчет экономической эффективности установки для очистки и утилизации газовых выбросов на примере водогрейного котла ПТВМ-100. Приведены количественные значения основных статей затрат на оборудование котельного агрегата шахтной мультиблочной установкой и ее эксплуатацию.

**Ключевые слова:** теплогенератор, природный газ, газовые выбросы, очистка, утилизация, экологическая и экономическая эффективность.

К важнейшим проблемам, связанным со сжиганием органического топлива на теплоэнергетических предприятиях, в первую очередь относятся выбросы в окружающую среду с дымовыми газами вредных компонентов — оксидов азота, серы, углерода и др. При работе котлов на природном газе число токсигенов уменьшается, но выбросы оксидов азота остаются в большом количестве. Снижение вредных выбросов с дымовыми газами в атмосферу затрудняется из-за высокой стоимости и технологических сложностей в организации безотходного производства.

Данная статья является продолжением исследований [1, 2] по очистке дымовых газов теплогенераторов от вредных компонентов. Она посвящена оценке экологической и экономической эффективности новой конструкции установки для очистки и утилизации дымовых газов теплогенераторов большой и средней мощности, разработанной сотрудниками Юго-Западного государственного университета и филиала ОАО «Квадра» — «Южная генерация» [3]. С целью упрощения конструкции установки и технологии очистки из ее состава исключен дополнительный экономайзер.

Шахтная мультиблочная установка для очистки и утилизации газообразных выбросов те-

плогенераторов (см. рисунок) работает следующим образом. Дымовые газы из транзитного газохода 1 при открытии входных клапанов 7, 8 и закрытии отсечного клапана 2 направляются через окна 3 в зону обработки, расположенную в шахте 4, разделенную вертикальными перегородками 5 на параллельные газоходы 6, в которых установлены воздухоподогреватели-абсорберы (ВПА) 9. В зоне обработки дымовые газы сначала поступают в трубное пространство первой ступени охлаждения дымовых газов 10, наружная поверхность оребренных труб которой охлаждается дутьевым воздухом, поступающим из переточной камеры 17. После первой ступени частично охлажденные дымовые газы направляются в окислительную камеру 13, где смешиваются с озоновоздушной смесью, подаваемой из патрубка 14 с насадком 15. Далее они поступают в трубное пространство второй ступени охлаждения 11, наружная поверхность оребренных труб которой омывается дутьевым воздухом от вентилятора (на рисунке не показан), где охлаждаются до более низкой температуры (70–80 °С) с конденсацией части водяных паров.

Из второй ступени охлаждения дымовые газы направляются в камеру 16, где происходит усреднение концентраций реагирующих

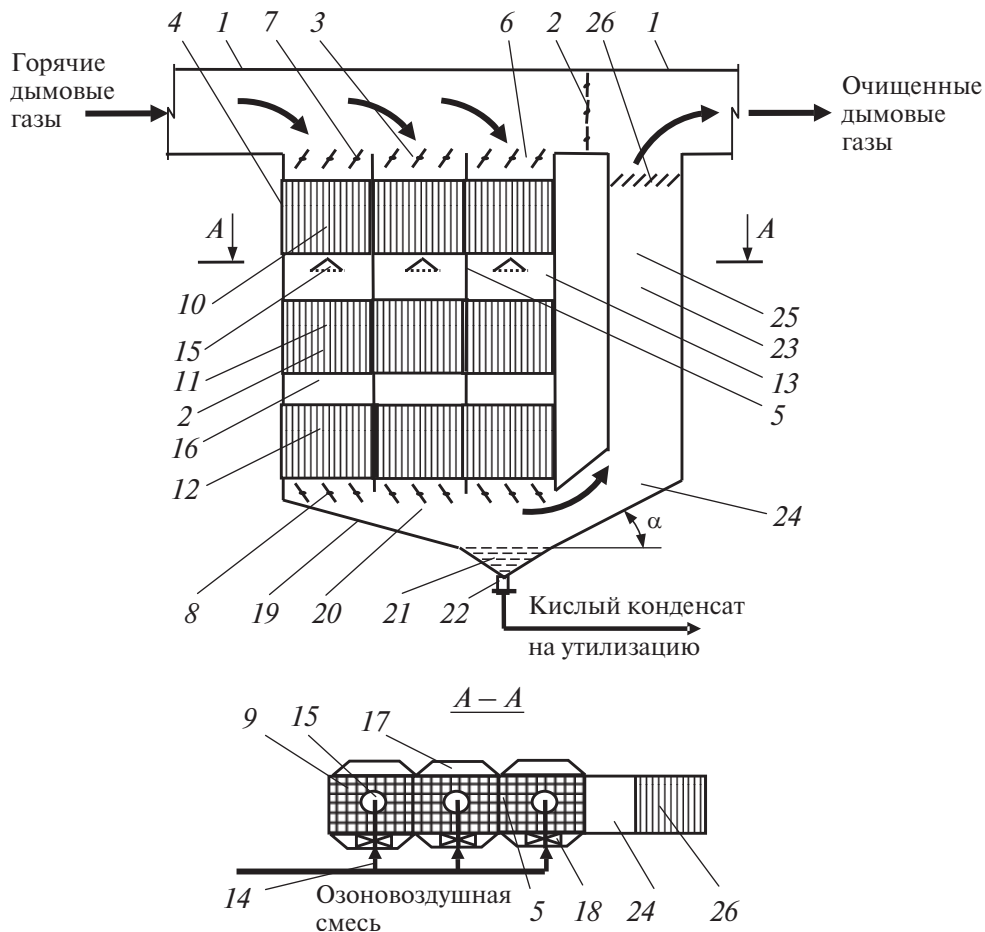


Схема шахтной мультислойной установки для очистки и утилизации газообразных выбросов теплогенераторов:

1 — транзитный газоход; 2 — отсекный клапан; 3 — окно; 4 — вертикальная шахта; 5 — вертикальная перегородка; 6 — параллельный газоход; 7, 8 — входные клапаны; 9 — воздухоподогреватель-абсорбер; 10–12 — первая–третья ступени охлаждения; 13 — окислительная камера; 14 — патрубок подачи озоновоздушной смеси; 15 — перфорированный насадок; 16 — камера усреднения; 17 — переточная камера; 18 — осевой вентилятор; 19 — поддон; 20 — газовый коллектор; 21 — коническое дно; 22 — конденсатный патрубок; 23 — сепарационная секция; 24 — наклонный газоход; 25 — вертикальный газоход; 26 — каплеотбойник

компонентов по всему объему. Затем дымовые газы поступают в трубное пространство третьей ступени охлаждения 12, наружная поверхность оребренных труб которой омывается наружным воздухом, подаваемым осевым вентилятором 18. Здесь дымовые газы охлаждаются до конечной температуры (40–50 °С) с конденсацией большей части водяных паров (дальнейшее охлаждение ограничено температурным напором, обусловленным начальной температурой наружного воздуха). Так как температура дымовых газов значительно меньше 100 °С и в них присутствуют озон и кислород, то в ступенях охлаждения 11 и 12 происходит быстрая реакция окисления труднорастворимого монооксида азота NO в легко растворимый диоксид азота NO<sub>2</sub>, соединяющийся с водой с образованием азотной кислоты HNO<sub>3</sub>. При этом в условиях конденсации скорость кислотообразо-

вания возрастает в 10 раз по сравнению с обычной абсорбцией окислов азота. Поскольку в третьей ступени 12 дымовые газы охлаждаются наружным воздухом до 40–50 °С, скорости реакций окисления оксидов азота и абсорбции их водой значительно возрастают, что обеспечивает более полное удаление оксидов азота из дымовых газов. Образующийся конденсат стекает по внутренней поверхности труб ступеней охлаждения 11 и 12 в виде пленки, контактируя с дымовыми газами в прямоходе (это обеспечивает минимальное гидравлическое сопротивление аппарата) с получением диоксида азота NO<sub>2</sub>, серного ангидрида SO<sub>3</sub> и их абсорбцией с образованием азотной и серной кислот HNO<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, в итоге насыщается кислотными компонентами. После этого кислый конденсат (смесь разбавленной азотной и серной кислот) при выходе дымовых газов в газовый

коллектор 20 за счет силы тяжести осаждаются в коническом днище 21 поддона 19, откуда через конденсатный патрубок 22 подается на утилизацию.

Из газового коллектора 20 дымовые газы поступают в сепарационную секцию 23, где очищаются в результате процессов осаждения и сепарирования в наклонном и вертикальном газоходах 24, 25 и сепарационной решетке 26 от уносимых капель конденсата. Очищенные от большей части оксидов азота (степень очистки — 70–80 %) и конденсата водяных паров (степень очистки — 50–60 %), дымовые газы через магистральный газоход 1 выводятся в атмосферу. При этом однонаправленное движение сверху вниз дымовых газов и пленки конденсата в трубах ступеней охлаждения 10–12 предотвращает образование отложений (частиц сажи, золы и др.) на их внутренней поверхности, так как они уносятся потоком дымовых газов и конденсата в поддон 19, где осаждаются вместе с кислым конденсатом в днище 21.

Установка обеспечивает комплексное сочетание очистки дымовых газов от вредных компонентов, уменьшения их тепловых выбросов, утилизации большей части теплоты и улавливаемых компонентов, включая водяные пары, и абсорбции оксидов азота конденсатом водяных паров в присутствии озона.

Технологическая эффективность шахтной мультиблочной установки достигается благодаря проведению практически всех процессов очистки и утилизации (за исключением очистки конденсата водяных паров от кислотных компонентов) в одном аппарате и использованию в качестве хладагента только воздуха (приточного и наружного), что упрощает конструкцию и аппаратурное оформление установки.

Исследование процессов очистки в реальных условиях эксплуатации котельных агрегатов проводили на опытно-промышленной установке, представляющей собой уменьшенную копию одного блока шахтной мультиблочной установки — ВПА, в котором одновременно протекают процессы охлаждения дымовых газов, конденсации водяных паров, окисления оксидов азота, их абсорбции конденсатом и очистки дымовых газов от вредных газообразных примесей. В качестве объекта для испытаний технологических параметров опытно-промышленной установки очистки использовали водогрейный котел ПТВМ-100, расположенный на ТЭЦ филиала

ОАО “Квадра” — “Южная генерация”. Номинальная теплопроизводительность котла — 100 Гкал/ч, топливо — природный газ, давление воды на входе — не более 1,6 МПа, на выходе — не более 1,0 МПа, температура воды на входе (основной режим/пиковый режим) — 70/110 °С, температура воды на выходе — 150 °С, гидравлическое сопротивление — 0,25 МПа, расход воды (основной/пиковый) — 1235/2460 т/ч, КПД котла — не менее 90,1 %.

В реальных условиях котел работает в трех режимах: при теплопроизводительности 34,2 Гкал/ч температура уходящих газов — 79 °С, КПД брутто котла — 96,22 %, содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах — 57 мг/м; при теплопроизводительности 38,5 Гкал/ч температура уходящих газов — 85 °С, КПД брутто котла — 96,03 %, содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах — 55 мг/м; при теплопроизводительности 47,1 Гкал/ч температура уходящих газов — 97 °С, КПД брутто котла — 95,63 %, содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах — 59 мг/м.

В результате серии экспериментов в третьем режиме работы котла (теплопроизводительность — 47,1 Гкал/ч) были получены: степени очистки дымовых газов от оксидов азота  $e = (66 \div 70) \%$ , от оксида углерода  $e = (37 \div 42) \%$ , повышение КПД  $\Delta\eta = (0,43 \div 0,52) \%$ , количество конденсата  $\Delta g = (0,23 \div 0,24) \text{ г/м}^3$ .

Эффективность процесса очистки и утилизации теплоты уходящих газов анализировали с помощью уравнения теплопередачи:

$$H_k = Q_{\text{ут}} / (k\Delta t \cdot 10^3), \quad (1)$$

где  $H_k$  — общая площадь конвективной поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $Q_{\text{ут}}$  — количество утилизированной теплоты уходящих газов, кВт;  $k$  — коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\Delta t$  — температурный напор, К.

Из уравнения (1) видно, что при увеличении  $Q_{\text{ут}}$  и соответственно снижении тепловых потерь с уходящими газами  $q_2$  необходимо в первую очередь увеличить площадь поверхности теплообмена  $H$ . Потери теплоты с уходящими газами  $q_2$  являются наибольшими в тепловом балансе котельного агрегата и зависят в основном от температуры уходящих газов [4]. При этом по мере ее уменьшения снижается температурный напор  $\Delta t$ , что вызывает повышенный рост площади теплообменной поверхности  $H$ . Кроме того, при понижении температуры уходящих газов возрастают потери на тягу, поскольку увеличиваются сопротивление газового тракта и

скорость серно-кислотной коррозии, снижается высота теплового и динамического выброса газов, что ведет к ухудшению экологической обстановки в районе расположения ТЭС.

Таким образом, выбор температуры уходящих газов является технико-экономической задачей, решение которой направлено на определение минимума годовых расчетных затрат. Дополнительные затраты, связанные с понижением температуры уходящих газов при сохранении температуры горячего воздуха, могут быть представлены в виде [5]

$$S = \Delta S_{\text{ВП}} + \Delta S_{\text{ЭК}} + \Delta S_{\text{ТД}} - \Delta S_{\text{ТОП}} + \Delta S_{\text{ТР}}, \quad (2)$$

где  $\Delta S_{\text{ВП}}$ ,  $\Delta S_{\text{ЭК}}$  — дополнительные затраты на увеличение площади поверхностей нагрева воздухоподогревателя и экономайзера;  $\Delta S_{\text{ТД}}$  — то же на оплату электроэнергии, необходимой на преодоление дополнительных сопротивлений тягодутьевого тракта;  $\Delta S_{\text{ТР}}$  — то же на увеличение высоты трубы;  $\Delta S_{\text{ТОП}}$  — снижение затрат на оплату топлива вследствие уменьшения его расхода.

Условие оптимума температуры определяется минимумом расчетных затрат. Его находят из решения уравнения

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_{yx}} = 0. \quad (3)$$

Отрицательные стороны снижения потерь теплоты с уходящими газами при рассматриваемом способе компенсируются положительными эффектами, вносимыми работой установки очистки дымовых газов и утилизации их теплоты, к которым относятся:

уменьшение выбросов оксидов азота на 70 % и оксида углерода на 40 %;

увеличение КПД котельного агрегата на 0,5 %;

утилизация конденсата водяных паров ( $0,24 \text{ г/м}^3$  дымовых газов);

возможность использования типового теплообменного оборудования котельных агрегатов;

принципиальная возможность утилизации вредных компонентов дымовых газов.

Дополнительные затраты, связанные с эксплуатацией предлагаемой шахтной мультимодальной установки для очистки сбросных газов и утилизации их теплоты, по аналогии с выражением (2) при сохранении температуры горячего воздуха могут быть представлены в виде

$$S_{o,y} = \Delta S_{\text{ВПА}} + \Delta S_{\text{ОЗ}} + \Delta S_{\text{В}} + \Delta S_{\text{АН}} + \Delta S_{\text{ТД}} - \Delta S_{\text{ТР}} - \Delta S_{\text{ТОП}} - \Delta S_{\text{У.К}}, \quad (4)$$

где  $\Delta S_{\text{ВПА}}$  — затраты на изготовление ВПА;  $\Delta S_{\text{ОЗ}}$ ,  $\Delta S_{\text{В}}$ ,  $\Delta S_{\text{АН}}$  — затраты на озонатор, вентилятор, анионитный фильтр;  $\Delta S_{\text{У.К}}$  — снижение затрат за счет утилизации конденсата;  $\Delta S_{\text{ТД}}$  — затраты на оплату электроэнергии, необходимой на преодоление дополнительных сопротивлений тягодутьевого тракта, а также для электроснабжения озонатора и вентилятора.

Стоимость оборудования и тарифы на электроэнергию и газ принимали по ценам на январь 2013 г. в Курске.

В выражении (4) расходы на дополнительную высоту трубы  $\Delta S_{\text{ТР}}$  приведены с отрицательным знаком, так как установка обеспечивает снижение выбросов оксидов азота на 70 %, а оксида углерода — на 40 %, что позволяет уменьшить высоту трубы. Кроме того, добавляется снижение затрат за счет количества утилизированного конденсата дымовых газов  $\Delta S_{\text{У.К}}$ . Оплата за электроэнергию  $\Delta S_{\text{ТД}}$  увеличивается из-за добавления в технологическую схему озонатора и высоконапорного вентилятора. С учетом опыта эксплуатации холодильников-конденсаторов нитрозных газов в производстве азотной кислоты стоимость изготовления теплообменных поверхностей ВПА возрастает на 25 % по сравнению с обычными трубчатыми теплообменниками из углеродистой стали [6].

Экономическую эффективность предлагаемого способа оценивали по результатам опытно-промышленных испытаний шахтной мультимодальной установки для очистки и утилизации газообразных выбросов теплогенераторов в третьем режиме работы котла КВГМ-100. В расчете теплопроизводительность котла была пересчитана из Гкал/ч в МВт ( $41,7 \text{ Гкал/ч} = 48,15 \text{ МВт}$ ). Годовая продолжительность работы  $\tau_{\text{уст}} = 8000 \text{ ч}$ . Снижение расхода на высоту трубы  $\Delta S_{\text{ТР}}$  в расчете не учитывали. Производительность оборудования установки очистки и соответственно расходы на нее принимали по фактической нагрузке котла в третьем режиме. Результаты расчета приведены в таблице.

Срок окупаемости  $\tau_{\text{ок}} = \Delta K / \Delta \mathcal{E}$  составил 3,5 года.

Из таблицы видно, что наиболее существенными затратами на дополнительное оборудование являются затраты на изготовление ВПА (дополнительных теплообменных поверхностей). Из эксплуатационных дополнительных затрат основные — затраты на элек-



Затратная статья	Годовые затраты, руб/год	Удельные затраты, руб/МВт
Изготовление ВПА $\Delta S_{\text{ВПА}}$	1 570 000	38 500
Озонатор $\Delta S_{\text{O}_3}$	498 000	10 400
Вентилятор $\Delta S_{\text{В}}$	100 000	2080
Анионитный фильтр $\Delta S_{\text{АН}}$	300 280	6260
Электроэнергия для озонатора и высоконапорного вентилятора $\Delta S_{\text{O}_3 + \text{ВВ}}$	146 000	31 000
Электроэнергия для дополнительной тяги $\Delta S_{\text{Т}}$	63 000	1100
Суммарная электроэнергия $\Delta S_{\text{ТД}}$	209 000	32 100
Снижение затрат на оплату топлива $\Delta S_{\text{ТОП}}$	988 000	20 600
Снижение затрат за счет утилизации конденсата $\Delta S_{\text{У.К}}$	355 000	7380
Общее снижение затрат	1 343 000	27 980
Экономия затрат на эксплуатацию $\Delta \mathcal{E}$	1 134 000	28 700
Общие затраты на оборудование $\Delta S_{\text{Об}}$	2 468 280	51 200
Дополнительные капитальные вложения $\Delta K$	3 960 000	82 000

троэнергию, причем большая ее часть потребляется озонатором и вентилятором, т. е. непосредственно на проведение процесса очистки. Но процесс обеспечивает значительную удельную экономию за счет уменьшения расхода топлива и утилизации конденсата водяных паров, в результате чего эксплуатация установки осуществляется с положительным удельным эффектом (27 980 руб/МВт). Таким образом, результаты расчета экономической эффективности очистки дымовых газов от окидов азота и утилизации их теплоты при помощи шахтной мультиблочной установки для водогрейного котла большой мощности показывают, что хотя оснащение котла установкой очистки требует определенных дополнительных капитальных вложений (51 200 руб/МВт), затраченные средства вполне оправдывают себя как с экологической, так и с экономической стороны (степень очистки дымовых газов от оксидов азота — 0,7, срок окупаемости — 3,5 года). Следует отметить, что аналогичный способ очистки для паровых котлов еще несколько лет назад был экономически неэффективен [2]. Но в связи с современной тенденцией непрерывного роста цен на топливо (в том числе и

газообразное) рассмотренные способ очистки и установка для его реализации уже в настоящее время эффективны не только по своим экологическим, но и по экономическим показателям.

#### Список литературы

1. **Ежов В. С.** Снижение вредных газообразных выбросов источников центрального теплоснабжения. — Промышленная энергетика, 2006, № 12.
2. **Ежов В. С.** Об экономической эффективности синхронной очистки и утилизации газовых выбросов теплогенерирующих установок. — Промышленная энергетика, 2008, № 4.
3. **Пат. 2448761 РФ, МПК В 01 D 53/00.** Шахтная мультиблочная установка для очистки и утилизации газообразных выбросов теплогенераторов / В. С. Ежов, А. О. Алифанов, А. А. Воронин, Г. П. Клевцов. Изобретения. — Полезные модели, 2012, № 12.
4. **Делягин Г. Н., Лебедев В. И., Пермяков Б. А.** Теплогенерирующие установки. — М.: Стройиздат, 1987.
5. **Липов Ю. М., Третьяков Ю. М.** Котельные установки и парогенераторы. — М.: Ижевск, 2005.
6. **Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности** / Под ред. В. М. Олевского. — М.: Химия, 1985.

vl-ezhov@yandex.ru