ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 9, с. 94–102

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

СИСТЕМА СЕЛЕКТИВНОГО НЕКАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ NO_x НА ЗАВОДАХ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТКО В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ: ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЯТЫХ РЕШЕНИЙ

© 2025 г. В. С. Киреенко[a], *, А. Н. Тугов[a], **, В. А. Безруков[b], ***

[a]*Всероссийский теплотехнический институт, 3-й Автозаводской проезд, д. 4, корп. 1, Москва, 115280 Россия*

[b]*ООО "Специальная энергия", ул. Ивана Франко, д. 8, Москва, 121108 Россия*

**e-mail: kireenckovova@yandex.ru*

***e-mail: ANTugov@vti.ru*

****e-mail: sl4v1k@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2025 г.
После доработки 23.03.2025 г.
Принята к публикации 02.04.2025 г.

В связи с непрерывным ростом объемов твердых коммунальных отходов (ТКО) их утилизация при минимальном негативном воздействии на окружающую среду становится весьма актуальной задачей. Термическая переработка ТКО – это один из наиболее эффективных методов их утилизации, так как позволяет не только значительно сократить объем отходов, но и получить тепловую и электрическую энергию. Однако этот процесс сопровождается образованием оксидов азота (NO_x), которые способствуют возникновению смога и кислотных дождей, негативно влияют на экологическую обстановку и здоровье населения. Поэтому снижение выбросов NO_x является важной задачей для предприятий, сжигающих ТКО с отпуском потребителю электроэнергии и тепла. В статье рассматриваются технологии селективного некаталитического восстановления (СНКВ), применяемые для снижения выбросов NO_x на заводах Московской области. Представлено обоснование ключевых технических решений, включая выбор восстановителя (карбамида), транспортирующего агента (воздуха) и системы впрыска реагента через расположенные в три яруса сопла. Приведены результаты расчетов траекторий струй карбамидовоздушной смеси в поперечном потоке дымовых газов, подтверждающие эффективность предложенной конфигурации системы подачи восстановителя. Показано, что использование воздуха в качестве транспортирующего агента в сочетании с принятой схемой размещения сопл обеспечивает равномерное распределение реагента в зоне высоких температур, что повышает эффективность восстановления NO_x. Полученные результаты расчетных исследований могут быть применены при дальнейшей оптимизации работы системы СНКВ, а также при проведении режимно-наладочных испытаний на объектах, занимающихся утилизацией ТКО.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, термическая переработка, оксиды азота, СНКВ, карбамид, транспортирующий агент, форсунки, траектория струи

DOI: 10.56304/S0040363625700961

В условиях увеличивающихся объемов образования твердых коммунальных отходов проблема их утилизации приобретает все большую актуальность. Как показывает мировая практика обращения с ТКО, их термическая переработка играет ключевую роль в решении этой проблемы. Это эффективный способ утилизации отходов с отпуском потребителю как тепловой, так и электрической энергии [1]. Однако термическая переработка ТКО сопровождается выбросами загрязняющих веществ, среди которых значительную долю составляют оксиды азота. Попадая в атмосферу, они способствуют образованию смога и кислотных дождей, оказывают негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду [2].

На ТЭС, сжигающих органическое топливо, для снижения выбросов NO_x применяют различные технологии: рециркуляцию дымовых газов, установку малоэмиссионных горелок, многоступенчатое сжигание, а также селективное некаталитическое восстановление и селективное каталитическое восстановление (СКВ) оксидов азота [2–4].

Для котлов, сжигающих ТКО, наибольшее распространение в мире получила технология СНКВ. В зоны высоких температур котла, в кото-

ром сжигаются ТКО, впрыскиваются реагенты (восстановители), такие как аммиак или раствор карбамида. Это приводит к химическому превращению оксидов азота в безопасные для человека и окружающей среды азот и водяной пар. Данная технология позволяет снизить уровень выбросов NO_x до значений, удовлетворяющих современным экологическим требованиям и стандартам [5, 6]. Однако эффективность использования установок СНКВ во многом зависит от равномерного смешения в котле восстановителя и дымовых газов.

Цель данного исследования – проанализировать основные технические решения, принятые при реализации системы СНКВ на заводах по энергетической утилизации ТКО в Московской области. Для обеспечения равномерного перемешивания восстановителя и дымовых газов выполнены расчеты траекторий струй восстановителя в поперечном (сносящем) потоке дымовых газов в обоснование выбора конфигурации и расположения распределительных устройств (сопл) на котлах, которые установлены на этих заводах. Также рассмотрены технологические принципы СНКВ, преимущества и недостатки этого метода в сравнении с другими методами подавления NO_x, опыт его использования в нашей стране.

УСТАНОВКИ СНКВ: ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ

Основными преимуществами установок СНКВ по сравнению с установками СКВ являются:

низкие капитальные затраты;

невосприимчивость процесса к загрязнителям в дымовых газах (летучей золе, соединениям серы);

более высокая, чем у топочных методов, эффективность подавления NO_x.

Впервые технология СНКВ была применена в Японии в 1970-х годах на котельных установках, на которых топливом служили природный газ и мазут, затем в 1980-х годах – в России и странах Европы на тепловых агрегатах различного назначения, а с начала 1990-х годов – на угольных электростанциях США и стран ЕС [3].

В качестве восстановителей оксидов азота обычно используют аммиак или карбамид. Основные реакции восстановления оксида азота с помощью аммиака имеют вид:

$$4NO + 4NH_3 + O_2 = 4N_2 + 6H_2O; \quad (1)$$

$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 = 3N_2 + 6H_2O. \quad (2)$$

Продуктами реакции при применении карбамида являются N_2, H_2O, CO_2:

$$2CO(NH_2)_2 + 4NO + O_2 = 4N_2 + 2CO_2 + 4H_2O; \quad (3)$$

$$2CO(NH_2)_2 + 2NO_2 + O_2 = 3N_2 + 2CO_2 + 4H_2O. \quad (4)$$

В табл. 1 указаны преимущества и недостатки использования аммиака и карбамида в установках СНКВ.

Как правило, на ТЭС при выборе реагента предпочтение отдается карбамиду ввиду возможности его безопасного хранения и невысокой стоимости.

Для подачи реагента в котел обычно применяют пар или воздух. Необходимо отметить, что после поступления карбамида в котел для его нагрева и испарения капель требуется некоторое время, вследствие этого продолжительность взаимодействия восстановителя с оксидами азота сокращается. Для увеличения времени контакта и повышения эффективности очистки газов проводят предварительную термическую обработку водного раствора карбамида паром в реакторе-гомогенизаторе [7]. Однако этот метод имеет несколько недостатков:

требуется поддерживать параметры пара на уровне, необходимом для его подачи;

Таблица 1. Преимущества и недостатки использования карбамида и аммиака при СНКВ оксидов азота [5]

Реагент	Преимущества	Недостатки
Аммиак	Возможность подавления высоких пиковых значений NO_x. Более низкие выбросы N_2O [10–15 мг/м^3 (н.у.)]	Узкий температурный диапазон применения (850–950°C), поэтому требуется тщательный контроль температуры. Обращение и хранение опасного вещества. Повышенные удельные затраты на 1 т отходов. Появление запаха аммиака при контакте потоков с влажной средой
Карбамид	Более широкий диапазон эффективных температур (540–1000°C), поэтому температурный контроль менее критичен. Меньше опасность при хранении и обращении. Ниже удельные затраты на 1 т отходов	Меньший потенциал подавления пиковых значений NO_x по сравнению с аммиаком. Высокие выбросы N_2O [25–35 мг/м^3 (н.у.)]

система автоматизации довольно сложная;

температура в топке при подаче пара может опуститься ниже оптимальной.

При применении воздуха в качестве транспортирующего агента при распылении карбамида достигается достаточно мелкодисперсный распыл, что способствует эффективной работе системы очистки в целом. При организации пневматического распыла сложная система автоматизации не требуется. Конструкция установки пневматического распыла проще в эксплуатации и регулировке по сравнению с установками, работающими на паре. К тому же подаваемый воздух турбулизирует газовый поток, что благоприятно воздействует на смешивание раствора карбамида с дымовыми газами. Использование воздуха в качестве транспортирующего агента в установках, сжигающих ТКО, является наиболее предпочтительным вариантом, так как при этом обеспечивается лучшее распределение реагента при изменяющихся характеристиках и разном составе отходов.

Эффективность очистки дымовых газов на установках СНКВ зависит от изложенных далее условий.

Температурная зона в котле. Восстановитель должен подаваться в зону котла с температурой 850...1100°С. Оптимальной температурой является 950°С [7]. При достижении нижней температурной границы скорость реакции падает, а при подаче реагента в зону более высоких температур начинается окисление аммиака [8].

Время, необходимое для полного завершения реакций восстановления, должно быть не менее 0.5 с. Время пребывания восстановителя в оптимальной температурной зоне зависит не только от конструкции и режима работы котла, но и от особенностей ввода восстановителя в высокотемпературную зону [9].

Мольное соотношение восстановителя и NO_x. Оптимальным при эксплуатации систем СНКВ считается мольное отношение $NH_3 : NO_x$ равное 1.1 : 1.5. При более высоких значениях этого соотношения увеличивается проскок аммиака, что приводит к загрязнению конвективных поверхностей нагрева из-за образования солей аммония в низкотемпературной зоне котла [9].

Смешение реагентов с дымовыми газами. Хорошее смешение восстановителя и дымовых газов в системе СНКВ является критически важным условием для обеспечения максимального снижения выбросов NO_x и предотвращения проскока аммиака.

Для равномерного распределения восстановителя по сечению газохода и подачи его в зону оптимальных температур котла ТЭС, работающего на органическом топливе, обычно используют

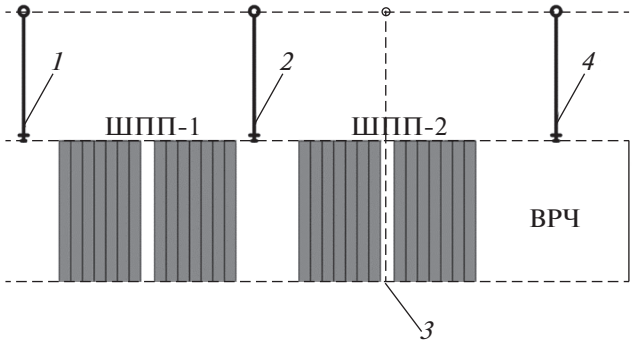


Рис. 1. Четырехступенчатая схема ввода восстановителя в газоход котла П-50Р Каширской ГРЭС [11]. *1–4* – ступени СНКВ; ШПП-1, ШПП-2 – ширмовые пароперегреватели первой и второй ступени; ВРЧ – верхняя радиационная часть

трубные решетки, размещенные между поверхностями нагрева (как правило, между ступенями пароперегревателя). Например, многоступенчатая подача реагента для СНКВ была реализована на пылеугольном котле П-50Р Каширской ГРЭС [10]. Восстановитель подавали в распределительные решетки, расположенные в высокотемпературной зоне котла: перед, после и в рассечку ширмового пароперегревателя (рис. 1).

Благодаря использованию технологии СНКВ концентрация оксидов азота в уходящих дымовых газах котла П-50Р Каширской ГРЭС снизилась с 1060 до 520 мг/м^3 при нормальных условиях (далее н. у.) при нормативном значении 570 мг/м^3 (н. у.), а концентрация аммиака в уходящих дымовых газах не превышала 20 мг/м^3 (н.у.) [3].

Похожее решение было применено на Кировоканской ТЭЦ. Для ввода аммиака в котел использовали два раздающих коллектора, соединенных вертикальными трубами с отверстиями. Трубы были сгруппированы в девять секций, а оси струй, истекавших из отверстий, направлялись под углом к потоку дымовых газов [3].

Данный способ подачи реагента в котел (с помощью распределительных устройств) имеет следующие недостатки: высокую стоимость, сложность конструкции и трудности обслуживания установки в целом. Кроме того, при сжигании низкокачественного топлива или ТКО на решетках могут образовываться зольные отложения, снижающие эффективность их работы.

Альтернативным решением является подача реагента в котел с помощью форсунок [12]. Например, на угольной станции Marl (ФРГ) форсунки разместили в топочной камере котла в четырех зонах по семь форсунок в каждой. Форсунки первой и второй зон установили на фронтовой стенке котла, а раздача восстановителя в третью и четвертую

зоны осуществлялась с потолка. Такая схема позволила эффективно использовать реагент при вводе его в зоны требуемых температур, улучшить его смешение с дымовыми газами и, в конечном итоге, существенно снизить выбросы NO_x.

В настоящее время СНКВ-технология используется не только в электроэнергетике, но и в других отраслях для снижения выбросов оксидов азота с дымовыми газами из различных источников [7]. Она особенно эффективна для применения в котлах, сжигающих ТКО, так как их конструкция позволяет поддерживать требуемую температуру в топочной камере в диапазоне 850–950°С и время выдержки не менее 2 с. Кроме того, котлы работают, как правило, на постоянной нагрузке [1]. При соблюдении таких условий коэффициент восстановления (снижения выбросов) NO_x может доходить до 50% и выше. Именно поэтому для снижения выбросов NO_x на большом количестве котлов, сжигающих ТКО, как отмечалось ранее, используют СНКВ-технологию.

Примером предприятия, успешно применяющего технологию СНКВ при термической переработке ТКО, может служить Московский спецзавод (МСЗ) № 2, расположенный на севере столицы. Поскольку фоновая концентрация NO_x в воздухе в этом районе достаточно высокая, Департаментом природопользования и охраны окружающей среды г. Москвы для этого предприятия были установлены жесткие ограничения по выбросам NO_x – не более 70 мг/м^3 (н. у.).

Для очистки уходящих газов от оксидов азота на МСЗ № 2 была внедрена СНКВ-технология с использованием карбамида в качестве восстановителя. Концентрацию NO_x в уходящих дымовых газах удалось поддерживать в диапазоне 50–70 мг/м^3 (н. у.), проскок аммиака не превышал регламентированного значения [10 мг/м^3 (н. у.)] и составлял, как правило, 3–5 мг/м^3 (н. у.) [10].

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СНКВ НА СТРОЯЩИХСЯ МОСКОВСКИХ ЗАВОДАХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТКО

В настоящее время в Московской области планируется построить и ввести в эксплуатацию четыре завода, предназначенных для энергетической утилизации ТКО, производительностью до 700 тыс. т ТКО в год, на которых для снижения выбросов оксидов азота будет применена технология СНКВ. На рис. 2 показана принципиальная схема такого завода.

Мусоровозы проходят через автовесовую, где проводится учет и контроль поступающих ТКО, далее отходы направляются на разгрузку в приемный бункер. С помощью крана ТКО загружают в воронку и затем на колосниковую решетку котла. Под колосниковую решетку вентилятором подают нагретый в паровых подогревателях первичный воздух, который забирается из бункера хранения ТКО. Для дожигания СО, исключения образования зон восстановления и поддержания необходимой температуры в топочной камере поток газов в первом газоходе котла смешивается со вторичным воздухом, который также нагревается в подогревателе, и рециркулирующими дымовыми газами. Для очистки дымовых газов от оксидов азота применяют систему СНКВ, реализованную в первом газоходе котла (топочной камере). Далее дымовые газы проходят через конвективные поверхности нагрева котла (пакеты пароперегревателя и экономайзера), систему очистки, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу. Часть пара из барабана котла направляется на подогрев первичного воздуха в соответствующий подогреватели. Для охлаждения отработавшего пара применена воздушно-конденсационная установка.

В системе СНКВ в качестве реагента используется карбамид, подача которого в первый газоход котла осуществляется через сопла сжатым воздухом, что, как было отмечено ранее, является оптимальным решением для установок, в которых сжигаются ТКО. Сопла (48 шт.) установлены в три яруса по ширине и фронту топочной камеры и сгруппированы по секциям (рис. 3).

Каждая секция состоит из распределительного модуля и подающих сопл на нескольких ярусах по высоте и ширине топочной камеры (распылительный модуль). Принципиальная схема одной из секций приведена на рис. 4.

Каждое устройство подачи карбамида состоит из двух сопл диаметром 3 и 5 мм, установленных под углом 10 и 30° к стене топочной камеры и работающих одновременно. Такое решение позволяет покрыть восстановителем все сечение первого газохода топочной камеры котла. По периметру топочной камеры расположены пирометры для измерения температуры газов. При достижении в секциях температуры от 850 до 1100°С по сигналу пирометра через сопла в поток дымовых газов впрыскивается раствор карбамида. Количество впрыскиваемого вещества может плавно уменьшаться на первом ярусе сопл (вплоть до прекращения его подачи) и увеличиваться на последующих. Однако для наиболее полного восстановления NO_x целесообразно использовать все три яруса.

Как уже отмечалось, в качестве транспортирующего агента выбран воздух. Он подается на распределительный модуль после его заполнения раствором карбамида. Давление, с которым поступает воздух, определено из условия распыления карбамида в виде мелкодисперсных капель. Высокая скорость распыления снижает риск за-

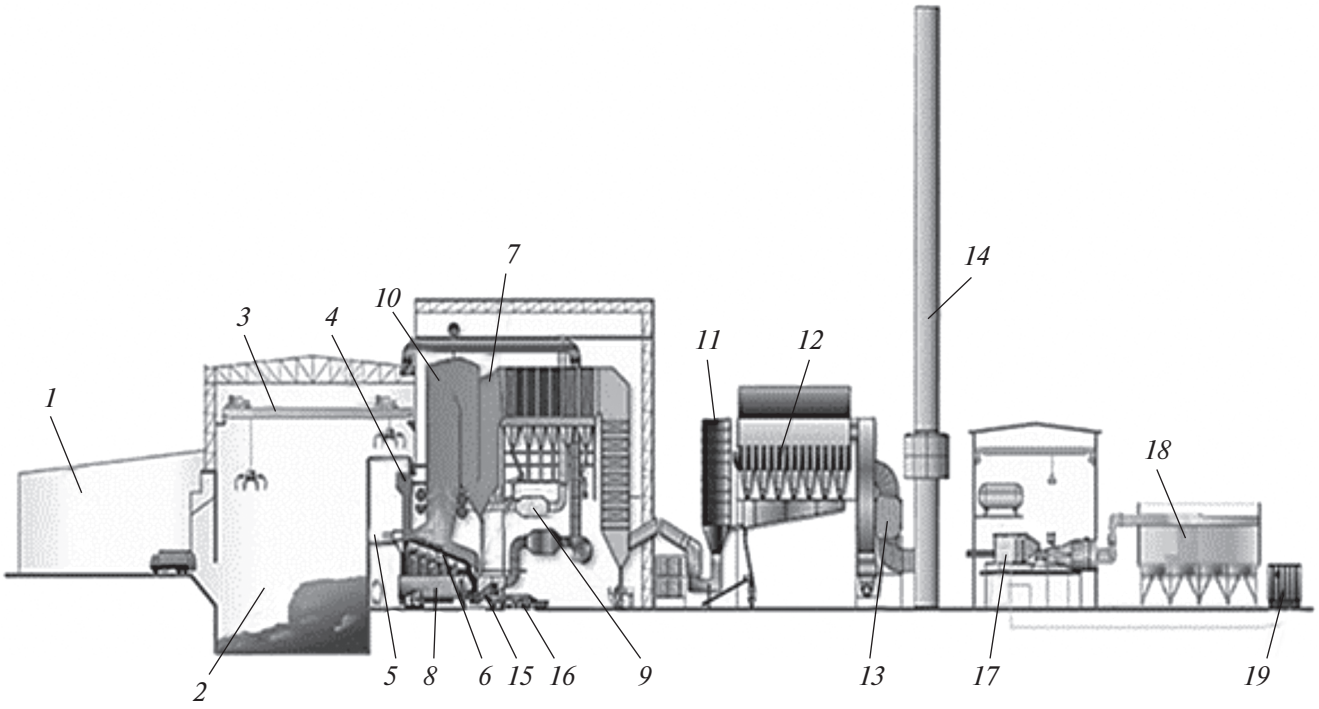


Рис. 2. Схема завода по энергетической утилизации ТКО.
1 – доставка отходов; *2* – приемный бункер отходов; *3* – кран загрузки отходов; *4* – загрузочная воронка; *5* – питатель; *6* – колосниковая решетка; *7* – паровой котел; *8* – подогреватель первичного воздуха; *9* – подогреватель вторичного воздуха; *10* – впрыск реагента; *11* – реактор; *12* – тканевый фильтр; *13* – подогреватель конденсата; *14* – дымовая труба; *15* – удаление золы и шлака; *16* – конвейер для транспортировки золы и шлака; *17* – паровая турбина; *18* – воздушно-конденсационная установка; *19* – трансформатор

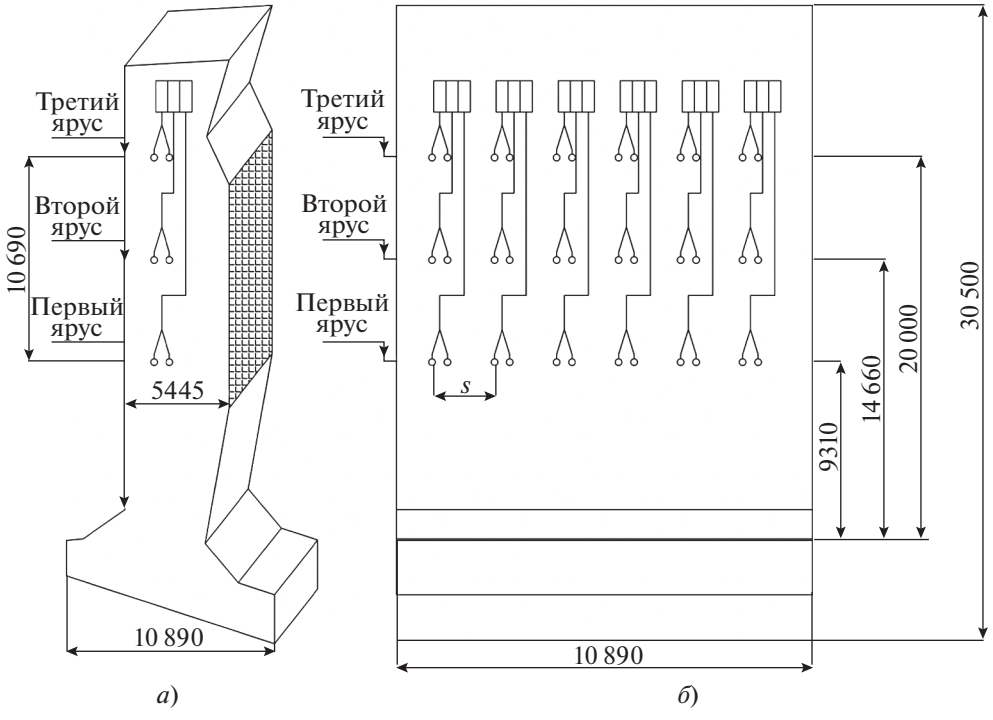


Рис. 3. Схема установки модулей впрыска системы СНКВ по ширине (*а*) и фронту (*б*) топки

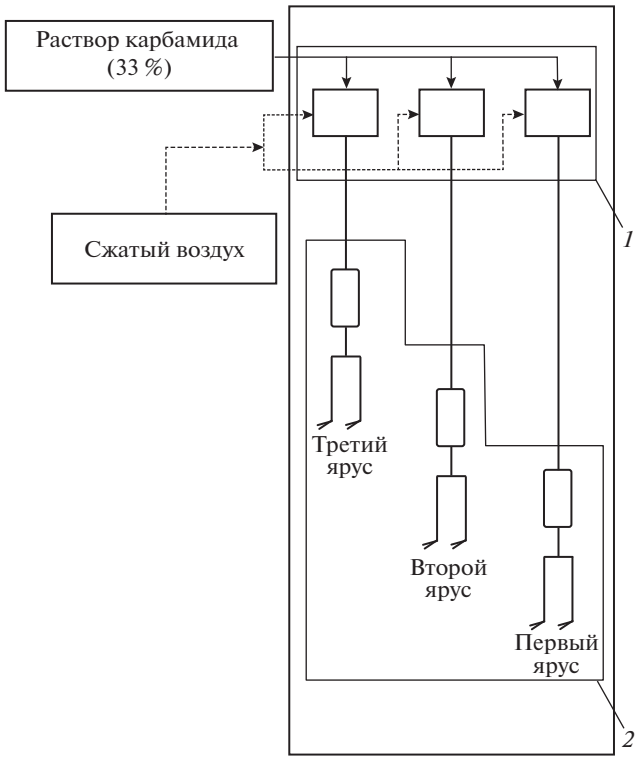


Рис. 4. Принципиальная схема секции.
1 – распределительный модуль; *2* – распылительный модуль

сорения сопл. Воздух также подают на неактивные сопла для их охлаждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТРАЕКТОРИЙ СТРУЙ И ОЦЕНКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕАКЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ NO_x

Как упоминалось ранее, эффективность технологии СНКВ напрямую зависит от качества смешения восстановителя с дымовыми газами, которое, в свою очередь, определяется глубиной проникновения струй транспортирующего агента в поток дымовых газов.

Оценка глубины проникновения струй, обеспечивающей требуемую полноту смешения, проводилась методом расчета траекторий струй в сносящем потоке [13]. Для построения расчетной модели были сделаны следующие допущения:

распределение скоростей газообразных продуктов сгорания ТКО по сечению топочной камеры равномерное;

температура дымовых газов по высоте футерованной части первого газохода котла (топочной камеры) считается постоянной и равной 900°С;

в качестве расчетной скорости карбамидовоздушной смеси на выходе из сопл принимается скорость воздуха;

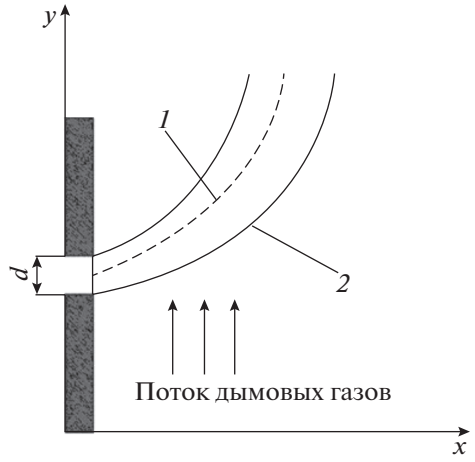


Рис. 5. Схема струи в сносящем потоке.
1 – скоростная ось; *2* – передняя граница струи

структура струи – осесимметричная;

критерием полного перемешивания восстановителя с дымовыми газами считается достижение струями, истекающими из сопл, расположенных по фронту котла, противоположной стенки (тыла) топочной камеры.

На рис. 5 схематично изображена струя в поперечном потоке газов. Положения скоростной оси (линии, соединяющей точки с максимальными значениями скоростей) и передней границы струи показаны штриховой и сплошной линией соответственно.

Для системы осесимметричных струй в поперечном потоке траектория скоростной оси струи может быть описана соотношениями [13]:

$$\frac{y_y}{d} = 1.01\left(\frac{x}{d}\right)^{\beta} q^{0.4}; \qquad (5)$$

$$\beta = 0.49\left(\frac{s}{d}\right)^{-3} + 0.376, \qquad (6)$$

где $q = \dfrac{\rho_0 u_0^2}{\rho_\infty u_\infty^2}$; u_0 и ρ_0 – скорость и плотность восстановителя (карбамидовоздушной смеси); u_∞ и ρ_∞ – скорость и плотность дымовых газов (поперечного потока); x – расстояние от устья сопла по ширине топочной камеры; d – диаметр сопла; s – шаг между соплами; β – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий влияние взаимного расположения форсунок при вводе карбамидовоздушной смеси.

Расчет скоростей дымовых газов в первом футерованном газоходе котла (топочной камере) при номинальном режиме работы установки

(расход ТКО 30 т/ч) выполняли для ТКО среднего состава со следующими характеристиками, %:

Содержание:	
углерода	24.1
водорода	3.4
кислорода	17.9
азота	0.8
серы	0.1
хлора	0.4
Зольность	28.6
Влажность	24.7

Состав дымового газа и его термодинамические свойства определяли с использованием формул и данных [14–16]. Геометрические параметры топочной камеры соответствовали рис. 3.

С учетом ранее принятых допущений расчетная скорость потока дымовых газов в футерованной части первого газохода составила 3.5 м/с, плотность – 0.3 кг/м^3. Исходя из начальной концентрации NO_x на выходе из топки, расхода дымовых газов и оптимального при эксплуатации систем СНКВ мольного отношения $NH_3 : NO_x$, расход 33%-ного водного раствора карбамида принимали равным примерно 75 кг/ч.

В табл. 2 представлены параметры карбамидовоздушной смеси при работе системы СНКВ в номинальном режиме для различных расходов транспортирующего агента (воздуха).

Используя соотношения (5) и (6) и рассчитанные параметры сред, вычисляли траектории скоростных струй в сносящем потоке для всех режимов и типов сопл. На рис. 6 в качестве примера показаны траектории струй для режимов 1 и 5.

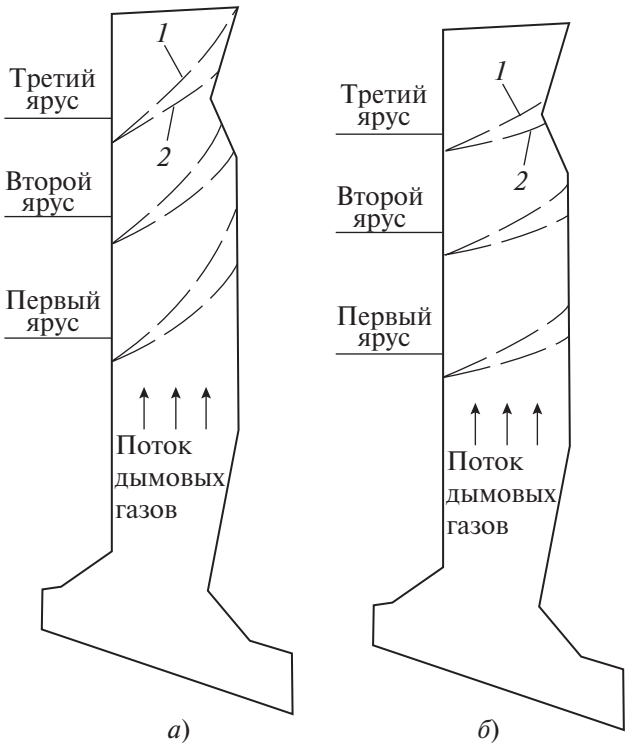


Рис. 6. Результаты расчетов траекторий скоростных струй для сопл диметром 3 и 5 мм для режимов 1 (*а*) и 5 (*б*).
Расположение оси струи для форсунки диаметром, мм: *1* – 3; *2* – 5

На основе полученных данных была выполнена оценка продолжительности реакции восстановления NO_x (времени прохождения дымовыми газами

Таблица 2. Параметры карбамидовоздушной смеси при различных режимах работы СНКВ

Параметр	Режим				
	1	2	3	4	5
Расход на систему СНКВ:					
карбамида, кг/ч	75	75	75	75	75
воздуха, м^3/ч (н. у.)	565	645	800	970	1050
Давление воздуха на входе в систему СНКВ, МПа	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Температура воздуха на входе в систему СНКВ, °С	20	20	20	20	20
Скорость воздуха для форсунки, м/с:					
диметром 3 мм	34.68	39.66	49.54	59.48	64.44
диметром 5 мм	29.13	33.32	41.64	49.96	54.13
Суммарный расход воздуха и карбамида для форсунки, кг/ч:					
диаметром 3 мм	10.09	11.4	14.02	16.63	17.94
диаметром 5 мм	23.54	26.6	30.6	38.82	41.87
Плотность карбамидно-воздушной смеси, кг/м^3	11.43	11.30	11.18	10.99	10.94

Таблица 3. Продолжительность реакции восстановления NO_x в топочной камере котла в зависимости от места подачи карбамидно-воздушной смеси (яруса сопл) при различных расходах воздуха

Параметр	Режим				
	1	2	3	4	5
Расход воздуха на систему СНКВ, м^3/ч (н. у.)	565	645	800	970	1050
Время реакции восстановления NO_x, с, при подаче карбамидовоздушной смеси через ярус:					
первый	3.10	3.30	3.55	3.60	3.65
второй	1.55	1.75	2.00	2.05	2.10
третий	0	0.25	0.50	0.54	0.55

участка от места соприкосновения струи с противоположной стенкой топочной камеры вверх до их выхода из футерованной зоны) (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что время пребывания дымовых газов в топочной камере после полного их смешения с карбамидовоздушной смесью, необходимое для завершения реакций восстановления, должно составлять не менее 0.5 с при расходе воздуха 800 м^3/ч (н. у.). При уменьшении расхода время реакции в третьем ярусе сокращается. Повышение же расхода воздуха сверх 800 м^3/ч (н. у.) не приводит к существенному увеличению времени, необходимого для пребывания дымовых газов в топке.

Таким образом, для системы СНКВ оксидов азота, которая будет установлена на строящихся в Московской области заводах, расход воздуха на уровне 800 м^3/ч (н. у.) является оптимальным. Расчеты также показали, что выбранная конструкция форсунок диаметрами 3 и 5 мм позволяет добиться значительного охвата зоны распыла и эффективного перемешивания газов с восстановителем.

Дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию работы системы СНКВ на рассмотренном объекте, планируется выполнить методом численного моделирования. В качестве исходных данных (расходы сред, конфигурация сопл) будут приняты полученные в настоящей работе значения.

ВЫВОДЫ

1. Мировой опыт показывает, что технология селективного некаталитического восстановления имеет высокую эффективность в снижении выбросов оксидов азота на установках по термической переработке твердых коммунальных отходов. Поэтому ее применение на заводах в Московской области вполне обосновано.

2. Для котлов, сжигающих ТКО, использование воздуха в качестве транспортирующего агента для подачи карбамида в топочную камеру через систему сопл является оптимальным решением.

3. Проведенные расчеты траекторий карбамидовоздушных струй в поперечном потоке показывают, что многоярусные системы подачи реагента обеспечивают равномерное распределение восстановителя по всей топочной камере благодаря глубокому проникновению струй в поток дымовых газов.

4. Полученные при выполнении расчетов результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях, направленных на оптимизацию работы системы СНКВ на конкретном объекте, а также при проведении режимно-наладочных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тугов А.Н.** Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС: монография. М.: ВТИ, 2017.
2. **Природоохранные** технологии на ТЭС: учеб. / И.С. Никитина, В.Б. Прохоров, И.В. Путилова, Н.Д. Рогалёв, М.П. Роганков, П.В. Росляков, Г.А. Рябов, А.С. Седлов, В.Б. Тупов, В.В. Шишенко; под общ. ред. Н.Д. Рогалёва и В.Б. Прохорова. М.: Изд-во МЭИ, 2021.
3. **Ходаков Ю.С.** Оксиды азота и теплоэнергетика. Проблемы и решения. М.: ЭСТ-М, 2001.
4. **ИТС 38-2022**. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2022.
5. **ИТС 9-2020**. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами. М.: Бюро НДТ, 2020. https://docs.cntd.ru/document/573338441
6. **Directive** 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance) // O. J. L. 2008. V. 312. P. 3–30. http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj

7. **Повышение** эффективности систем некаталитической очистки дымовых газов от оксидов азота / О.Н. Кулиш, С.А. Кужеватов, И.Ш. Глейзер, С.Ф. Торхунов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019. № 1. С. 15–19.
8. **Котлер В.Р., Росляков П.В.** Снижение выбросов оксидов азота // Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: информ. сб. под общ. ред. В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. С. 13–37.
9. **Развитие** технологии некаталитической очистки дымовых газов от оксидов азота / О.Н. Кулиш, С.А. Кужеватов, Е.В. Иванова, К.И. Запорожский, В.А. Широков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 4. С. 6–9. https://rucont.ru/efd/644786
10. **Запорожский К.И.** Минимизация образования вторичных загрязнителей в двухстадийном процессе селективного некаталитического восстановления оксидов азота: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2021.
11. **Кулиш О.Н., Орлова М.Н., Запорожский К.И.** Некаталитическая очистка дымовых газов от оксидов азота на промышленных предприятиях нефтегазового комплекса // Тезисы докл. Междунар. практ. конф. “Химия, экология и рациональное природопользование”. Магас, Республика Ингушетия, Россия, 21–13 октября 2021 г. С. 210–214.
12. **Развитие** технологии СНКВ и перспективы ее применения / С.Н. Аничков, А.М. Зыков, А.Г. Тумановский, О.Н. Кулиш, К.И. Запорожский // Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 110–116. https://doi.org/10.1134/S0040363621060011
13. **Трофимченко С.И.** Организация смешения газовых сред путем внедрения струй в поперечный поток в МГД установках: дис.... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1981.
14. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Красиной. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1973.
15. **Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.** NIST reference fluid thermodynamic and transport properties – REFPROP // NIST standard reference database 23, 2013. https://www.nist.gov/srd/refprop
16. **Fanaritis J.P., Bevevino J.W.** The tubular exchanger manufacturers association and industry // J. Pressure Vessel Technol. 1976. V. 98. Is. 2. P. 185–187. https://doi.org/10.1115/1.3454358

Selective Noncatalytic NO_x Reduction System at MSW Energy Waste Recycling Plants in Moscow Oblast: Justification of Decisions Made

V. S. Kireenko[a], *, A. N. Tugov[a], **, and V. A. Bezrukov[b], ***

[a] All-Russia Heat Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

[b] OOO Special Energy, Moscow, 121108 Russia

**e-mail: kireenckovova@yandex.ru*

***e-mail: ANTugov@vti.ru*

****e-mail: sl4v1k@yandex.ru*

Abstract—Due to the continuous growth of municipal solid waste (MSW) volumes, their disposal with minimal negative impact on the environment is becoming a very urgent task. Thermal recycling of MSW is one of the most effective methods of their disposal because it allows not only to significantly reduce the volume of waste but also to obtain thermal and electrical energy. However, this process is accompanied by the formation of nitrogen oxides (NO_x), which contribute to the formation of smog and acid rain and negatively affect the environmental situation and public health. Therefore, the reduction of NO_x emissions is an important task for enterprises burning MSW with the release of electricity and heat to consumers. The article discusses selective noncatalytic reduction (SNCR) technologies used to reduce NO_x emissions at factories in Moscow oblast. The rationale for key technical decisions is presented, including the choice of reducing agent (urea), transport agent (air), and the reagent-injection system through nozzles arranged in three tiers. The results of calculations of the trajectories of the urea–air mixture jets in the cross-flow of flue gases are presented, confirming the effectiveness of the proposed configuration of the reducing agent supply system. It is shown that the use of air as a transporting agent in combination with the adopted nozzle placement scheme ensures uniform distribution of the reagent in the high-temperature zone, which increases the efficiency of NO_x reduction. The obtained results of the calculation studies can be used for further optimization of the SNCR system operation as well as for conducting operational tests at facilities engaged in MSW utilization.

Keywords: municipal solid waste, thermal processing, nitrogen oxides, SNCR, urea, transport agent, nozzles, jet trajectory