ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 10, с. 95–104

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

НАИБОЛЕЕ ВОСТРЕБОВАННЫЕ МЕТОДЫ СЕРООЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС В РОССИИ

© 2025 г. А. А. Строков[a], *, А. Н. Епихин[a], **, О. А. Киселева[a], ***

[a] Всероссийский теплотехнический институт,
ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4, Москва, 115280 Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 14.02.2025 г.
После доработки 29.05.2025 г.
Принята к публикации 04.06.2025 г.

Изложены современные экологические требования и текущее состояние в области очистки дымовых газов от диоксида серы на ТЭС в России и за рубежом. Приведены наиболее перспективные для внедрения в ближайшем будущем на ТЭС в России методы сероочистки дымовых газов, описан опыт Всероссийского теплотехнического института (ВТИ) при проектировании и внедрении таких установок. Рассмотрен опыт создания отечественной промышленной высокоэффективной и безотходной установки очистки отходящих дымовых газов ТЭС от диоксида серы производительностью 1.5 млн м^3/ч (при нормальных условиях) по аммиачно-сульфатной технологии, конечным продуктом которой является удобрение. Представлены технические решения, примененные при разработке базового проекта данной системы сероочистки на основе опыта освоения опытно-промышленной установки с использованием аммиачно-сульфатной технологии (АСТ) на Дорогобужской ТЭЦ и с учетом особенностей сжигаемого топлива, а также результаты математического моделирования устройства для ввода дымовых газов в аппарат предварительного охлаждения газа (предскруббер). Приведены результаты разработки проекта установки упрощенной “мокросухой” сероочистки дымовых газов эффективностью до 50% для котла паропроизводительностью 670 т/ч, а также результаты математического моделирования процесса впрыска капель суспензии извести в поток дымовых газов в форкамере электрофильтра и их испарения. Представлены данные по предварительному технико-экономическому обоснованию применения “мокрой” известняковой технологии сероочистки (МИСО) для снижения выбросов диоксида серы с учетом требований экологического законодательства для ряда ТЭС России.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, дымовые газы, диоксид серы, наилучшие доступные технологии, аммиачно-сульфатная технология сероочистки, известняковая сероочистка, упрощенная сероочистка

DOI: 10.56304/S0040363625600144

Диоксид серы SO_2 является одним из маркерных загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при эксплуатации тепловых электрических станций, работающих на сернистом топливе, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [1]. В [2, 3] определены технологические показатели выбросов на уровне наилучших доступных технологий (НДТ) 700–3000 мг/м^3 для SO_2 в сухих газах в пересчете на нормальные условия (0°С, 101.3 кПа) и содержание кислорода 6% (по объему) в зависимости от сернистости топлива и года введения оборудования в эксплуатацию. В отдельных случаях допускается содержание диоксида серы не более 5800 мг/м^3.

В странах Европейского союза (ЕС), США, Японии, Китае и др. технологические показатели выбросов диоксида серы в атмосферу существенно ниже, чем в России. В странах ЕС предельно допустимая концентрация диоксида серы в отходящих дымовых газах крупных топливосжигающих установок не превышает 150–200 мг/м^3 при пересчете на содержание кислорода 6% (по объему) при сжигании твердого топлива и 3% (по объему) при сжигании жидкого топлива.

В США также действуют строгие ограничения на выбросы SO_2 для ТЭС – не более 140 мг/м^3 в

пересчете на содержание кислорода 6% (по объему). В 1970-х годах в США начали активно внедрять установки сероочистки дымовых газов, а после ужесточения экологических стандартов в 1990-х годах и до 2023 г. выбросы SO_2 на ТЭС США по данным [4] сократились примерно на 95% главным образом благодаря сокращению выработки электроэнергии на угольных электростанциях и внедрению новых установок сероочистки дымовых газов ТЭС.

В Китае с 2005 г. реализуются программы по сокращению выбросов SO_2, предусматривающие как повышение эффективности использования топлива, так и внедрение установок сероочистки дымовых газов на угольных электростанциях. В 2014 г. в Китае были разработаны стандарты "ультранизкой эмиссии" с целью добиться снижения максимальной концентрации SO_2 в дымовых газах угольных ТЭС, которые в настоящее время оснащены установками сероочистки, до 35 мг/м^3 [5, 6].

Несмотря на то что при обеспечении ТЭС сероочистными установками капитальные затраты повышаются на 25–30%, а тарифы на электроэнергию – на 5–15% [7], в странах с жесткими экологическими нормативами (страны ЕС, США, Китай, Япония) эти установки обязательны для всех новых энергоблоков, на которых сжигаются мазут и твердое топливо [7, 8], и в настоящее время подавляющее большинство котлов, работающих на сернистом топливе, оборудованы системами сероочистки [9]. Во многих сероочистных установках (около 80%) применяются полые абсорберы с орошением известняковой суспензией. Это обусловлено их довольно высокой эффективностью (более 90%), а также доступностью и низкой стоимостью известняка по сравнению с другими реагентами.

В России в последние годы намечается тенденция к более строгому контролю выбросов вредных веществ. Объекты первой категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), к которым относится большая часть крупных ТЭС [10], в соответствии с законодательными документами [11, 12] должны быть оснащены системами автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ, в том числе SO_2.

Помимо этого, в рамках реализации Федерального проекта "Чистый воздух" проводится эксперимент по квотированию выбросов вредных веществ [13], направленный на снижение их валовых выбросов, в том числе SO_2, на 20–50% в городах с неблагоприятной экологической обстановкой, независимо от соответствия установленным технологическим показателям. Эксперимент охватывает 29 городов России [14] с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. В дальнейшем планируется расширение данного перечня [15].

Есть основания полагать, что уже в ближайшем будущем для выполнения требований экологической безопасности России оснащение ТЭС установками сероочистки дымовых газов станет необходимостью. При этом для повышения надежности эксплуатации ТЭС и обеспечения технологического суверенитета нашей страны в этой области целесообразно внедрять отечественные решения по сероочистке, о чем свидетельствует неудачный опыт реализации зарубежных технологий сероочистки на Черепетской и Троицкой ГРЭС, связанный с отсутствием должной технической поддержки со стороны зарубежных компаний, сложностями с техническим обслуживанием оборудования, поставкой запасных частей и другими факторами.

Существует большое число разных технологий очистки дымовых газов от SO_2, которые различаются, прежде всего, типом и состоянием используемого реагента. В настоящей статье рассмотрены наиболее перспективные, по мнению авторов, технологии сероочистки дымовых газов для внедрения на российских ТЭС в ближайшие годы, а также опыт Всероссийского теплотехнического института в разработке и опытно-промышленном освоении таких технологий.

При использовании высокосернистого топлива на ТЭС для обеспечения высокой степени сероочистки (90% и более) применяют "мокрые" технологии, в которых реагентами являются, главным образом, аммиачная вода и суспензии извести/известняка. Поглощение ими SO_2 (с учетом окисления образующихся сульфитов) осуществляется в соответствии со следующими химическими реакциями

$$SO_2 + 2NH_4OH + 1/2O_2 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + H_2O;$$

$$SO_2 + Ca(OH)_2 + 1/2O_2 + 2H_2O \rightarrow \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + H_2O;$$

$$SO_2 + CaCO_3 + 1/2O_2 + 2H_2O \rightarrow \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2.$$

Сотрудники ВТИ разработали и опробовали на опытно-промышленной установке аммиачно-сульфатную технологию сероочистки, основанную на связывании диоксида SO_2 и триоксида SO_3 серы с помощью аммиака NH_3 или его водного раствора NH_4OH (аммиачной воды) с последующим окислением образовавшихся продуктов реакций (сульфита и бисульфита аммония) кислородом воздуха до стабильного сульфата аммония $(NH_4)_2SO_4$ [2]. Используемый при реализации этой технологии реагент может быть также применен для очистки дымовых газов от оксидов азота в системе селективного каталитического восстановления или селективного некаталитического восстановления, что позволяет снизить капитальные затраты при монтаже узла хранения реагента при

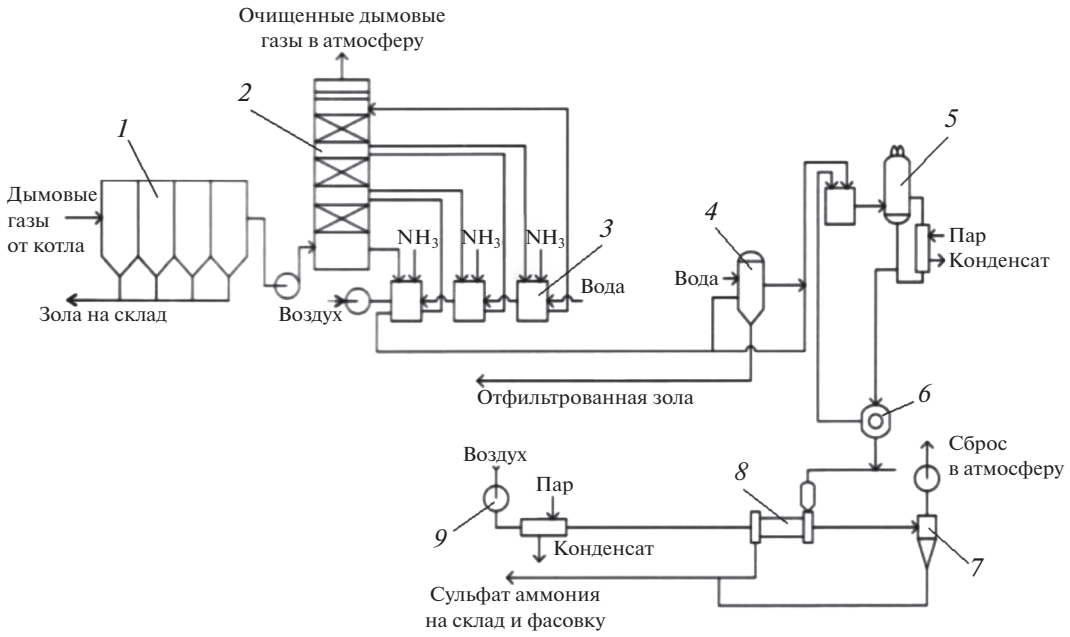


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки аммиачно-сульфатной сероочистки.
1 – электрофильтр; *2* – абсорбер; *3* – циркуляционная емкость; *4* – фильтр; *5* – выпарная установка; *6* – центрифуга; *7* – циклон; *8* – барабанная сушилка; *9* – вентилятор

совместном применении этих методов газоочистки. Следует отметить, что аммиак является веществом 4-го класса опасности (малоопасные вещества, для рабочей зоны ПДК = 20 мг/м^3), однако обладает токсическим действием, взрыво- и пожароопасен. Поэтому при хранении и использовании его в качестве реагента требуется соблюдение повышенных мер безопасности.

Принципиальная технологическая схема установки АСТ показана на рис. 1. Поглощение SO_2 из дымовых газов, поступающих после золоуловителя, осуществляется промежуточным раствором сульфит-бисульфит-сульфата аммония в насадочном абсорбере, а при подаче аммиака/аммиачной воды в циркуляционные емкости (вне абсорбционной зоны) происходит корректировка состава поглотительного раствора. В эти же емкости подается воздух для окисления сульфита аммония в сульфат. Из циркуляционных емкостей окисленный раствор сульфата аммония через фильтр направляется в выпарную установку, где происходит образование кристаллов сульфата аммония, которые затем отделяются от раствора в центрифуге и направляются в барабанную сушилку для получения продукционного сухого кристаллического сульфата аммония. Отфильтрованная зола из фильтра присоединяется к потоку золы из золоуловителя. Получаемый в конечном итоге продукт является азотным удобрением с массовым содержанием питательного элемента (азота) 21%. При использовании в качестве топлива углей качество этого продукта улучшается благодаря содержанию микроэлементов, выщелачивающихся в поглотительный раствор из летучей золы топлива в процессе очистки. Рыночная стоимость сульфата аммония выше себестоимости получаемого продукта. Таким образом, вложенные в его производство средства могут полностью окупаться при наличии потребителя. Дополнительные преимущества данной технологии – отсутствие сточных вод и других отходов вследствие замкнутого цикла производства, а также одновременное связывание оксидов азота примерно на 30%.

В настоящее время в ВТИ ведутся экспериментальные исследования по увеличению степени поглощения оксидов азота в установках аммиачно-сульфатной сероочистки [16].

Всероссийский теплотехнический институт имеет успешный опыт внедрения технологии аммиачно-сульфатной сероочистки дымового газа на опытно-промышленной установке производительностью 500000 м^3/ч на Дорогобужской ТЭЦ (Смоленская обл., 1993–1996 гг.). Содержание SO_2 в дымовых газах при сжигании высокосернистого подмосковного угля достигало 10 г/м^3, при этом степень очистки от SO_2 составляла 95–98% [17]. Получаемый товарный сульфат аммония соответствовал требованиям [18]. Данная установка сероочистки перестала функционировать после перевода Дорогобужской ТЭЦ на сжигание природного газа.

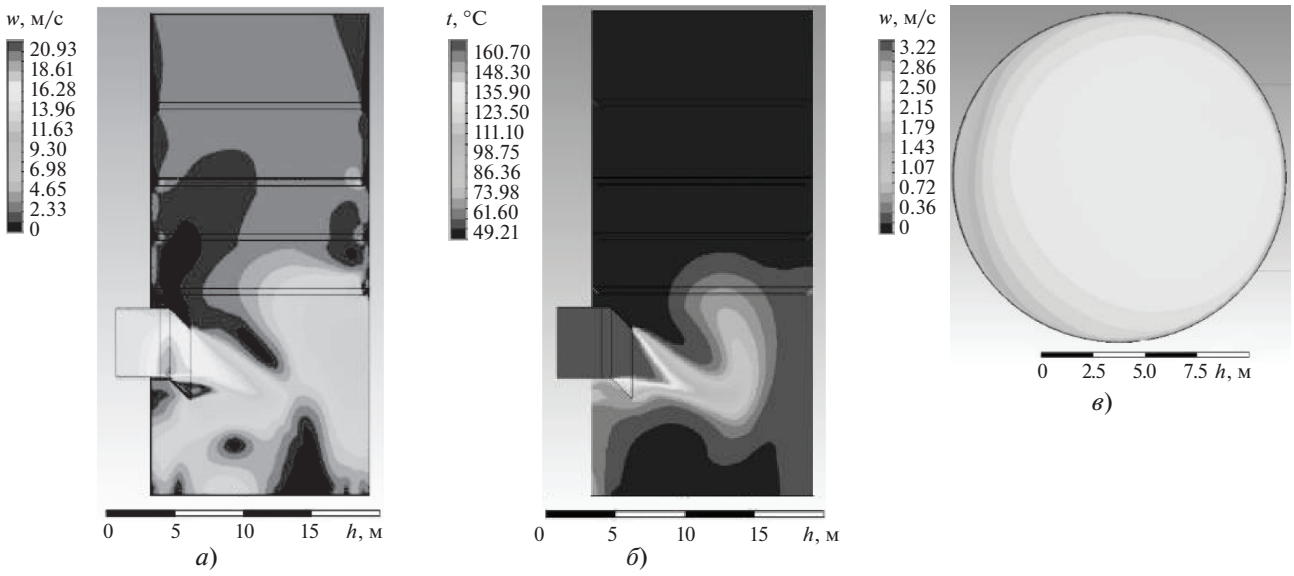


Рис. 2. Результаты математического моделирования потока дымовых газов в предскруббере при 100%-ной нагрузке установки сероочистки.
а, *в* – поле осевой скорости дымовых газов *w* по высоте предскруббера *h* и в поперечном сечении на выходе из него; *б* – поле температур дымовых газов *t* по высоте предскруббера

В настоящее время на одной из крупных российских ТЭС, работающей на нефтяном коксе, на основе базового проекта ВТИ построена единственная на сегодняшний день в России отечественная установка сероочистки дымовых газов, которая состоит из двух узлов:

охлаждения дымовых газов и абсорбции диоксида серы;

выпарки концентрированного раствора сульфата аммония и сушки твердого вещества с получением кристаллического продукта.

При разработке проекта новой установки аммиачно-сульфатной сероочистки за основу была взята технологическая схема сероочистки на Дорогобужской ТЭЦ (см. рис. 1). С учетом опыта эксплуатации этой установки были применены следующие технические решения, способствующие повышению эффективности и надежности ее работы:

дымовой газ охлаждается до температуры, соответствующей точке росы (54°С), перед абсорбером в испарительном полом аппарате (предскруббере), одновременно происходит концентрирование раствора сульфата аммония, которым орошается этот аппарат;

в абсорбере установлены два яруса орошения высокоэффективной насадки удельной площадью поверхности 250 $м^2/м^3$ с различной концентрацией рабочих растворов (более разбавленный раствор подается на верхний ярус насадки);

на выходе дымовых газов из абсорбера установлен сетчатый туманоуловитель;

свежая аммиачная вода (реагент) вводится в потоки рециркуляционных поглотительных растворов вне абсорбционной зоны с помощью специальных смесителей.

Эти решения позволяют добиться требуемой эффективности поглощения SO_2 (98%) при меньшей высоте абсорбера, значительно снизить проскок аммиака (до 10 ppm) и образование трудно улавливаемого тумана, а также сократить затраты пара на выпаривание раствора сульфата аммония и уменьшить габариты выпарного аппарата.

С учетом того что в золе используемого топлива присутствуют тяжелые металлы и несгоревший углерод, в проекте предусмотрена высокоэффективная система фильтрации концентрированного раствора сульфата аммония.

Поскольку главными аппаратами в установке являются предскруббер и абсорбер, важно поддерживать в них равномерные скорости и температуры дымовых газов, чтобы обеспечить ее устойчивую работу. Конструктивные решения по вводу дымовых газов в предскруббер и абсорбер прорабатывались с помощью современного программного продукта ANSYS Fluent. На рис. 2 приведены результаты математического моделирования потока дымовых газов в предскруббере при полидисперсном распределении размеров капель орошения. Входной распределитель газа представляет собой ряд определенным образом расходящихся пластин, приваренных к входному газоходу. Такая конструкция позволяет создать равномерное движение потока дымовых газов по сечению аппарата.

Далее приведены проектные технико-экономические показатели внедряемой установки аммиачно-сульфатной сероочистки:

Степень очистки дымовых газов от SO_2, % 98.0
Расход дымовых газов, м^3/ч.....1500000
Содержание SO_2 в дымовых газах, г/м^3:
начальное 6.1–6.8*
конечное 0.2
Проскок аммиака, ppm..... Не более 10
Начальная температура дымовых газов, °С..... 170
Коэффициент избытка реагента 1.0
Диапазон устойчивой работы установки (нагрузка по дымовому газу), % 35–110**
Доля потребляемой энергии энергоблока (с учетом дымососа), %..... 1.5
Площадь размещения оборудования, м^2 (м^2/МВт).....8000 (18)
Удельные капитальные вложения, руб/кВт.....5800

* Высокая концентрация SO_2 в дымовых газах вызвана сжиганием нефтяного кокса.

** Широкий диапазон нагрузки по дымовому газу обусловлен тем, что установка спроектирована на три котла.

В настоящее время на данной установке проводятся пусконаладочные работы при участии специалистов ВТИ.

В мировой практике наиболее широко применяется “мокрая” известняковая сероочистка. Преимуществами этой технологии, помимо экологической безопасности реагента и отходов для населения и окружающей среды, являются доступность и дешевизна известняка и возможность полезного использования получаемого продукта – гипса. Недостатки процесса – значительное потребление электроэнергии на собственные нужды вследствие необходимости интенсивного орошения абсорбера, образование загрязненных сточных вод, а также опасность зарастания гипсом внутренних поверхностей абсорбера при нарушении режима работы.

В рамках предварительного технико-экономического обоснования (ТЭО) разработки технических решений, направленных на максимальное снижение выбросов загрязняющих веществ от ТЭС и выполнение требований, установленных законодательством, в 2022–2023 гг. сотрудники ВТИ провели укрупненный расчет системы сероочистки МИСО для нескольких ТЭС России с подбором оборудования МИСО и его компактной многоуровневой компоновкой с учетом стесненных условий (рис. 3). При этом удалось уменьшить необходимую расчетную площадь для размещения оборудования сероочистки до 5 м^2/МВт. Все оборудование располагается на четырех этажах пятиэтажного здания с обвязкой вокруг абсорбера.

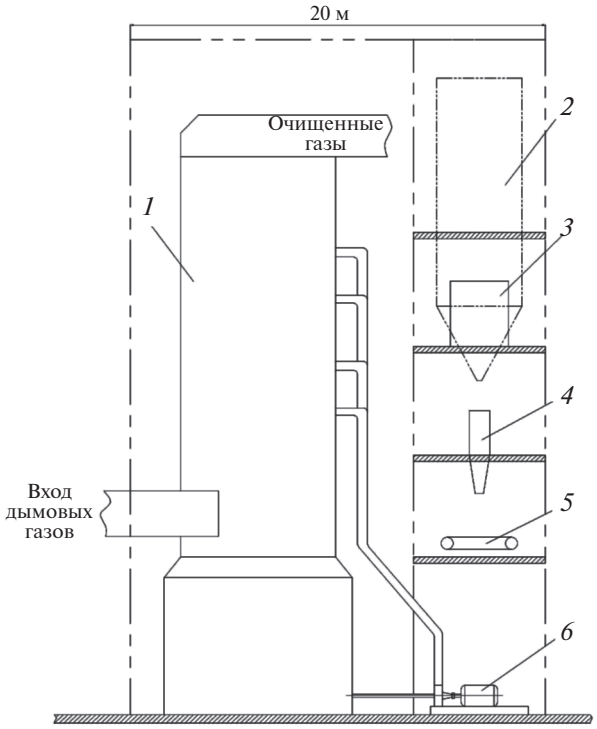


Рис. 3. Многоуровневая компактная компоновка “мокрой” известняковой сероочистки для котла паропроизводительностью 420 т/ч.
1 – абсорбер; *2* – силос известняка; *3* – бак промывной воды; *4* – гидроциклон; *5* – ленточный фильтр; *6* – циркуляционный насос

Далее приведены технико-экономические показатели установки “мокрой” известняковой сероочистки применительно к котлу паропроизводительностью 420 т/ч:

Степень очистки дымовых газов от SO_2, %..... 90.0
Расход дымовых газов, м^3/ч.....550000
Содержание SO_2 в дымовых газах, мг/м^3:
начальное 850
конечное..... Не более 200*
Коэффициент избытка реагента 1.05
Диапазон устойчивой работы установки, % 45–100
Доля потребляемой энергии энергоблока (без учета дымососа), % 2.56
Площадь размещения оборудования, м^2 (м^2/МВт) 600 (5)
Расход известняка, кг/ч 540
Производство получаемого гипса, кг/ч 857
Общие капитальные затраты, млн руб. (руб/кВт)..... 690 (6053)

* Остаточное содержание SO_2 в дымовых газах обусловлено требованием по квотированию выбросов для рассматриваемой ТЭС и рассчитано при выполнении ТЭО.

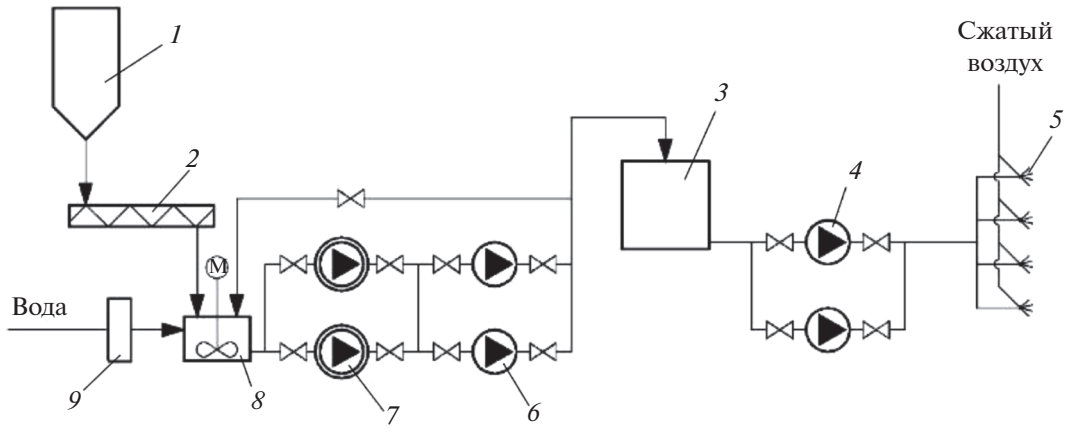


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема установки УМСТ.
1 – силос извести; *2* – транспортер; *3* – расходная емкость; *4*, *6* – насос; *5* – пневматическая форсунка в форкамере электрофильтра; *7* – диспергатор; *8* – емкость для приготовления суспензии; *9* – теплообменник

При сжигании большинства российских углей начальная концентрация SO_2 в дымовых газах составляет 700–1500 мг/м^3, необходимая степень очистки для обеспечения требуемых технологических показателей, а также при квотировании выбросов не превышает 50%. Для этих случаев целесообразно применять наиболее простые и дешевые “мокросухие” технологии, в которых реагент (гашеная известь) вводится в поток дымовых газов в виде суспензии, а на выходе получается сухой продукт сероочистки. Одной из таких малозатратных технологий является упрощенная “мокросухая” технология (УМСТ) [2]. Очистка проводится в форкамере электрофильтра, представляющей собой пустое поле без электродов. Таким образом, данная система сероочистки интегрируется в электрофильтр и установка дополнительных аппаратов не требуется.

Основные преимущества УМСТ – относительная простота аппаратурного оформления, невысокие капитальные затраты, малая площадь под размещение оборудования и небольшое энергопотребление. Эффективность упрощенной технологии сероочистки не превышает 50–60%, при этом повышенное содержание золы в дымовых газах негативно влияет на степень очистки. Недостатком также является содержание в уловленной золе продуктов сероочистки, что снижает товарные качества золы. Принципиальная технологическая схема установки УМСТ показана на рис. 4.

В 2001–2003 гг. технология УМСТ была опробована специалистами ВТИ на электрофильтре Дорогобужской ТЭЦ. Очистка от диоксида серы на 20–40% происходила благодаря распылению в диффузоре электрофильтра 5–8%-ной (по массе) известковой суспензии с помощью форсунок в поток дымовых газов прямотоком при полном испарении суспензии и требуемой степени очистки.

В 2023–2024 гг. в ВТИ был разработан проект установки УМСТ площадью 140 м^2 для котла паропроизводительностью 670 т/ч, работающего на угле. На рис. 5 представлена компоновка оборудования для хранения реагента (гашеной извести), приготовления суспензии известкового молока и его подачи в форсунки, а также промывки оборудования. Для подачи суспензии извести были использованы двухфазные форсунки, которые осуществляют распыление абразивной суспензии с помощью сжатого воздуха и обеспечивают получение достаточно мелких капель, что необходимо для устойчивого протекания процесса УМСТ с учетом малой длины форкамеры.

Наиболее “тонким” местом данной технологии сероочистки, помимо необходимости надежной работы установки без осаждения частиц извести, является ввод капель суспензии в поток дымовых газов, который должен осуществляться таким образом, чтобы с учетом конфигурации диффузора и форкамеры электрофильтра обеспечить:

равномерное распределение капель суспензии извести в потоке газов;

достаточное время существования капли для достижения заданной степени очистки дымовых газов от диоксида серы;

полное высыхание капель к моменту выхода потока газов из форкамеры;

максимально равномерное поле температур на выходе из форкамеры;

недопущение снижения температуры газов ниже точки росы;

отсутствие попадания капель на стенки электрофильтра.

Для выбора оптимального варианта ввода суспензии в поток газа специалисты ВТИ выполнили математическое моделирование процесса в программной среде ANSYS Fluent с учетом испарения капель вводимой жидкости.

Были рассмотрены различные варианты по общему количеству форсунок, их взаимному расположению и направлению распыла. Оптимальный вариант ввода суспензии в поток дымовых газов в форкамере электрофильтра при наиболее равномерном ее распределении в потоке дымовых газов и надежности регулирования расхода суспензии благодаря сохранению одинакового количества форсунок по ярусам показан на рис. 6. Результаты математического моделирования потока дымовых газов в форкамере электрофильтра при оптимальном вводе реагента, принятом в проекте, приведены на рис. 7.

Далее представлены проектные технико-экономические показатели установки УМСТ для котла паропроизводительностью 670 т/ч, работающего на угле:

Степень очистки дымовых газов от SO_2, % ..... До 50.0

Расход дымовых газов, $м^3$/ч..... 820 000

Содержание SO_2 в дымовых газах, $мг/м^3$:

начальное 1150*

конечное ..... Не более 700

Температура дымовых газов при номинальной/минимальной нагрузке, °С 146/126

Коэффициент избытка реагента 1.5

Расход реагента (гашеной извести), кг/ч 750

Электрическая мощность, кВт (% мощности энергоблока) 90 (0.04)

Площадь для размещения оборудования (без учета электрофильтра), $м^2$ ($м^2$/МВт) 140 (0.6)

Капитальные затраты (без учета электрофильтра), млн руб. (руб/кВт) 140 (620)

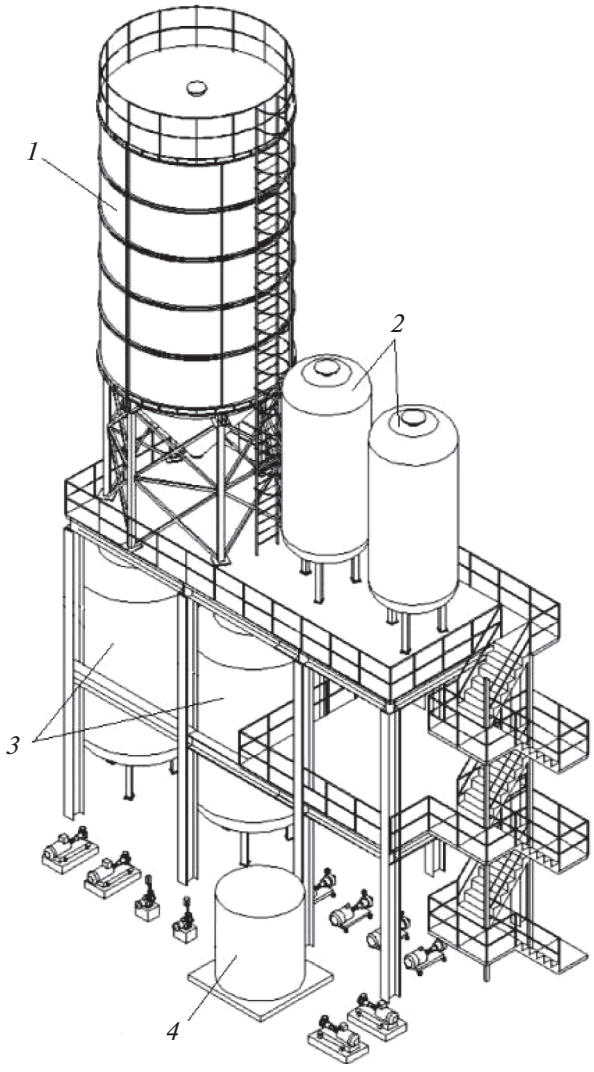


Рис. 5. Компоновка оборудования установки УМСТ. *1* – силос извести; *2* – емкость для приготовления извести; *3* – расходная емкость для суспензии; *4* – бак для промывной воды

При номинальном и минимальном режимах работы котла достигается полное испарение капель в форкамере электрофильтра, а температура в потоке газа не опускается ниже 75°С, что выше точки росы на 27°С. В расчетах учитывали водяную точку росы дымовых газов после сероочистки 48°С, так как принимали, что оксид серы SO_3, влияющий на значение сернокислотной точки росы, поглощается известковой суспензией вследствие своей высокой реакционной способности. При этом средняя температура дымовых газов на выходе из форкамеры электрофильтра снижается относительно температуры на входе на 40°С при номинальном и на 20°С при минимальном режимах работы котла.

* При содержании серы в топливе на рабочую массу 0.46%.

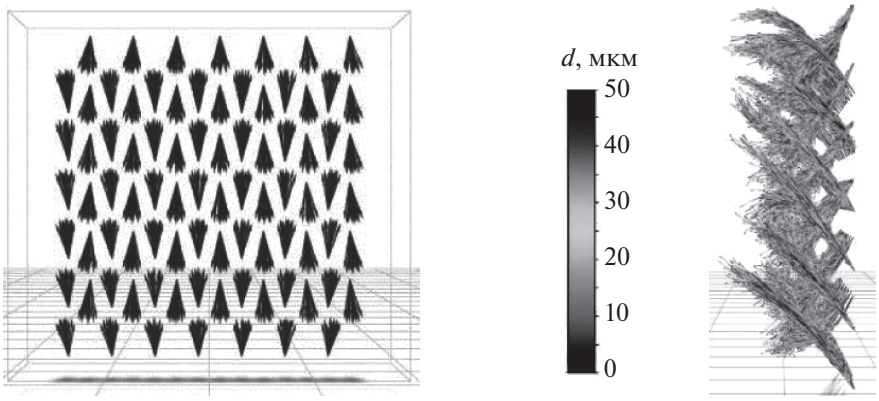


Рис. 6. Оптимальные расположение и ориентация форсунок в форкамере электрофильтра, рассмотренные при моделировании УМСТ.
а – векторы распыления жидкости форсунками (вид со стороны входа газа); *б* – распределение диаметров капель *d* при распылении жидкости форсунками под углом 60° (вид сбоку)

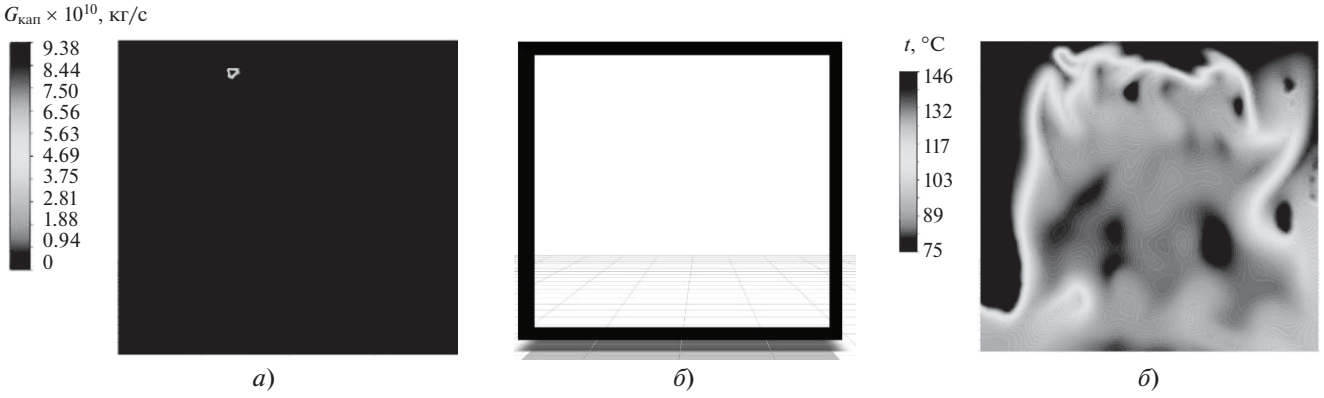


Рис. 7. Результаты моделирования для определения оптимального варианта расположения и ориентации форсунок УМСТ.
а – поле массового расхода капельной влаги $G_{кап}$ на выходе из форкамеры (отсутствие капельной влаги в пределах погрешности расчета); *б* – поле контакта капель со стенками форкамеры (отсутствие контакта и налипания на стенки форкамеры); *в* – поле температур дымовых газов на выходе из форкамеры (минимальная температура 75°С)

Внедрение упрощенной “мокросухой” сероочистки наиболее целесообразно при установке нового электрофильтра с предусмотренной форкамерой. В некоторых случаях эту технологию можно также применять на действующих энергоблоках для связывания SO_2 при переоборудовании первого поля электрофильтра с демонтажом электродов и установкой форсунок для ввода суспензии. Однако следует учитывать, что при таком переоборудовании эффективность электрофильтра не должна быть ниже проектной, т.е. повышение эффективности работы электрофильтра путем увлажнения дымовых газов и снижения их температуры должно компенсировать уменьшение количества его электрических полей. Все необходимое оборудование для установки УМСТ может быть изготовлено в России.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные в ВТИ технологии сероочистки дымовых газов ТЭС имеют высокие технико-экономическими показатели:

эффективность безотходной сероочистки по аммиачно-сульфатной технологии с получением удобрения в качестве побочного продукта, обладающей наилучшими технико-экономическими показателями среди “мокрых” технологий, составляет 99.5%;

упрощенная “мокросухая” сероочистка, не требующая больших капитальных вложений, имеет эффективность до 50%, что соответствует требованиям по квотированию выбросов SO_2.

2. Наиболее распространенная в мире “мокрая” известняковая сероочистка обладает высокой эффективностью (более 90%), при этом существует возможность многоуровневого размещения оборудования и сокращения необходимой площади для его размещения примерно вдвое.

3. Для успешного внедрения мероприятий по снижению выбросов диоксида серы на ТЭС требуется предварительная индивидуальная проработка подходящих технологий сероочистки (предварительные технико-экономическое обоснование, математическое моделирование, при необходимости дополнительные лабораторные, стендовые и опытно-промышленные испытания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение** Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р (ред. от 23.12.2023) “Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды и признании утратившими силу некоторых Постановлений Правительства РФ”.
2. **ИТС 38-2022.** Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. М.: Бюро НТД, 2022.
3. **Приказ** Минприроды России от 25.04.2023 № 248 “Об утверждении нормативного документа в области охраны окружающей среды «Технологические показатели наилучших доступных технологий сжигания топлив на крупных установках в целях производства энергии»”.
4. **Annual** sulfur dioxide (SO_2) emissions from electric utilities in the United States from 1970 to 2023. https://www.statista.com/statistics/504390/volume-of-sulfur-dioxide-emissions-from-fuel-combustion-in-electric-utilities-us/
5. **Air** quality and health benefits of China’s emission control policieson coal-fired power plants during 2005–2020 / W. Ruili, L. Fei, T. Dan, Z. Yixuan // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. Is. 9. P. 094016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3bae
6. **Substantial** emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards / T. Ling, Q. Jiabao, M. Zhifu, B. Xin // Nature Energy. 2019. V. 4. P. 929–938. https://doi.org/10.1038/s41560-019-0468-1
7. **Соловьев А.К., Михеев В.О., Пуликов П.С.** Очистка дымовых газов от оксидов серы // Вестник Сиб. гос. индустр. ун-та. 2014. № 3 (9). С. 33–36.
8. **Грибков А.М.** Наилучшие доступные технологии при использовании топлива на ТЭС: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2022.
9. **Грибков А.М.** Обеспечение технологического норматива по оксидам серы для котлов ТЭС // Изв. вузов. Энергетика. 2020. Т. 22. № 6. С. 164–175.
10. **Приказ** Минприроды России от 18.04.2018 № 154 “Об утверждении перечня объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, относящихся к I категории, вклад которых в суммарные выбросы, сбросы загрязняющих веществ в Российской Федерации составляет не менее чем 60 процентов”.
11. **Постановление** Правительства РФ от 13.03.2019 № 262 “Об утверждении Правил создания и эксплуатации системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ”.
12. **Приказ** Минприроды России от 18.02.2022 № 109 (ред. от 24.03.2023) “Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля”.
13. **Федеральный** закон № 195-ФЗ от 26.07.2019 “О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха”.
14. **Распоряжение** Правительства РФ от 07.07.2022 № 1852-р “Об утверждении перечня городских поселений и городских округов с высоким и очень высоким загрязнением атмосферного воздуха, дополнительно относящихся к территориям эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) в атмосферный воздух на основе сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха” (с изменениями на 17.08.2024).
15. **Протокол** Комиссии Государственного Совета Российской Федерации по направлению “Экология и природные ресурсы” от 19.04.2024 №5-24-П.
16. **Ряшенцев М.С., Епихин А.Н., Тимашков К.В.** Исследование процесса поглощения оксидов азота растворами сульфит-бисульфит-сульфата аммония в условиях аммиачно-сульфатной сероочистки дымовых газов // Энергетик. 2025. № 1. С. 12–16.
17. **Опыт** освоения опытно-промышленной установки очистки дымовых газов от диоксида серы на Дорогобужской ТЭЦ / В.М. Беляйкин, Б.В. Некрасов, С.К. Федорова, В.И. Угначев, И.Н. Шмиголь, В.П. Иноземцев, В.Ф. Солдатенко, Г.Я. Скляров, А.Ф. Матвеев // Электрические станции. 1996. № 7. С. 51–55.
18. **ГОСТ 9097-82.** Сульфат аммония. Технические условия. М.: Госстандарт, 1982.

The Most In-Demand Methods for Desulfurization of Flue Gases of Thermal Power Plants in Russia

A. A. Strokov[a], *, A. N. Epikhin[a], **, and O. A. Kiseleva[a], ***

[a] *All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), Moscow, 115280 Russia*

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

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

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

Abstract—The article presents modern environmental requirements and the current state of the art in the field of cleaning flue gases from sulfur dioxide at thermal power plants in Russia and abroad. The most promising methods of flue gas desulphurization for implementation in the near future at thermal power plants in Russia are presented, and the experience of the All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI) in the design and implementation of such installations is described. The experience of creating a domestic industrial highly efficient and waste-free installation for cleaning exhaust flue gases of thermal power plants from sulfur dioxide with a capacity of 1.5 million m^3/h (under normal conditions) using ammonium sulphate technology, the final product of which is fertilizer, is considered. The technical solutions applied in the development of the basic design of this desulphurization system are presented based on the experience of developing a pilot industrial plant using ammonia-sulphate technology (AST) at the Dorogobuzhskaya TPP and taking into account the characteristics of the fuel being burned as well as the results of mathematical modelling of a device for introducing flue gases into a gas precooling apparatus (prescrubber). The article presents the results of the development of a project for a simplified "wet-dry" flue gas desulphurization unit with an efficiency of up to 50% for a boiler with a steam capacity of 670 t/h as well as the results of mathematical modeling of the process of injecting lime suspension droplets into the flue gas flow in the prechamber of an electrostatic precipitator and their evaporation. The article presents data on the preliminary feasibility study of the use of wet limestone desulphurization technology (WLDST) to reduce sulphur dioxide emissions taking into account the requirements of environmental legislation for a number of thermal power plants in Russia.

Keywords: thermal power plants, flue gases, sulfur dioxide, best available technologies, ammonia-sulphate desulfurization technology, limestone desulfurization, simplified desulfurization