

Охрана окружающей среды

УДК 66.074.62

Горбунов А.В.¹, Мигалин С.В.¹, Козырев А.Ю.², Горбунов А.А.³

¹ **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: avgor1968@ukr.net

² **ООО «СТИКС-ОИЛ», Киев**

ул. Дегтяревская, 25-а, 04119 Киев, Украина, e-mail: kozyrev@mail.ru

³ **Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев**

пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: gorbunov1994@mail.ua

Сухие методы десульфуризации дымовых газов при слоевом сжигании угля в водогрейном котле малой мощности

Рассмотрены практические результаты проверки сухих методов очистки дымовых газов от диоксида серы в котлах малой мощности при слоевом сжигании угля. Проведен анализ сухих методов подавления SO₂ применительно к сжиганию высокосернистого угля в котлах малой мощности. Выявлены причины, ограничивающие эффективность используемых методов десульфуризации. Приведены графики зависимостей концентраций SO₂ в дымовых газах от способа ввода сорбента в топку котла мощностью 2,9 МВт при слоевом сжигании газовых углей. Определены абсолютные величины снижения концентрации диоксида серы в зависимости от применяемых методов сухой десульфуризации на котлах малой мощности. Даны практические рекомендации по усовершенствованию способа подачи сорбента в топливо для достижения максимальных результатов по снижению концентрации диоксида серы. *Библ. 4, рис. 5, табл. 1.*

Ключевые слова: диоксид серы, сорбент, десульфуризация, дымовые газы, водогрейный котел.

В связи с резко возросшей стоимостью природного газа все больше малых промышленных предприятий ищут ему альтернативную замену, стараясь любым способом оптимизировать расходы по приобретению более дешевых видов топлива и сжигания его в своих промышленных мощностях. Зачастую к уже эксплуатируемым газовым котлам покупают и вводят в эксплуатацию котлы на твердых видах топлива (уголь, древесные отходы, опилки, древесные пеллеты, солома и т.д.). Особым спросом пользуются котлы, унифицированные по твердым видам топлива. Однако при работе таких котлов на

твердых видах топлив возникает ряд проблем, которые существенно влияют не только на экологические характеристики котла, но и на эксплуатационные затраты предприятия.

На одном из тепличных комплексов Киевской обл. установлены и эксплуатируются два трехходовых твердотопливных жаротрубных водогрейных котла типа КСВа-2,9Р производства ООО МПВФ «Энергетик» номинальной производительностью 2,9 МВт каждый (рис.1).

По сравнению с котлами, работающими на природном газе, твердотопливные имеют меньший температурный напор по нагреваемым по-



Рис.1. Внешний вид котла КСВа-2,9Р.

верхностям. Для компенсации этого недостатка твердотопливный котел имеет увеличенную площадь теплообмена.

Для обеспечения эффективного сжигания топлива котел оснащен специальной слоевой топкой, с подвижной цепной решеткой. Она предназначена для непрерывного дозирования, распределения, а также сжигания угля, который располагается в бункере. Кроме того, она удаляет шлак в конце жаровой трубы агрегата. Для приведения в движение цепной решетки топки служит асинхронный трехфазный электромотор мощностью 0,37 кВт, оснащенный редуктором и клиноременной передачей.

Воздух, который требуется для сжигания топлива, распределяется на отдельные потоки и направляется в отдельные слоевые зоны. В зависимости от калорийности, влажности и зольности осуществляется независимая регулировка потоков.

Дымовые газы с помощью дымососа через два параллельно установленных циклонных фильтра направляются в дымовую трубу (рис.2). Тяжелые летучие фракции золы после циклонов попадают в золоприемник. Весь дымоотводный тракт, включая дымососы удаления дымовых газов, выполнен из обычной «черной» стали.

В качестве топлива для данных котлов в настоящее время использовали уголь, лабораторные характеристики которого приведены ниже:

Зольность на сухое состояние топлива, %	–	11,2
Общая влажность на рабочее состояние топлива, %	–	8,0
Выход летучих веществ на сухой беззольный остаток топлива, %	–	36,7
Нижняя теплота сгорания на рабочее состояние топлива, ккал/кг	–	6573
Содержание серы, %	–	3,5

Приведенные характеристики были получены по результатам анализа пробы угля, который был выполнен в аттестованной лаборатории Трипольской ТЭС.

В процессе эксплуатации котлов на таком виде угля предприятие столкнулось с рядом проблем. При ревизии газоотводящего тракта были обнаружены следы сернистоокислотной коррозии буквально на всех его элементах, а именно: на внутренних поверхностях корпусов дымососов, рабочих колесах дымососов, внутренних поверхностях газоходов на участках от дымососов до дымовых труб, внутренних поверхностях дымовых труб. На поду самих дымовых труб были обнаружены остатки прокорродировавшего металла. Кроме того, при более детальном осмотре несущих конструкций парников, выполненных из металла, явные следы коррозии были замечены и на них.

В связи с тем, что рассматривалась возможность подачи продуктов сгорания в теплицы для углекислого удобрения растений, было принято решение проверить эффективность сухих методов десульфуризации на котлах такого типа.

Количество химически связанного диоксида серы по любой технологии десульфуризации можно охарактеризовать интегральным уравнением [1]:

$$G_{SO_2} = \int K S (p_0 - p_s) dt, \quad (1)$$

где K — коэффициент массопередачи, $кг/(м^2 \cdot Па \cdot с)$; S — площадь поверхности взаимодействия, $м^2$; p_0 — парциальное давление диоксида серы в газовой среде, $Па$; p_s — давление диоксида серы у поверхности взаимодействия, $Па$; t — время реагирования, $с$.

Коэффициент массопередачи K определяется транспортными свойствами реагирующих фаз и кинетикой взаимодействия диоксида серы



Рис.2. Циклонные фильтры котлов КСВа-2,9Р.

с сорбентом, которые зависят от параметров среды, в первую очередь от температуры, а также скоростью самой медленной стадии процесса. Площадь поверхности взаимодействия S зависит от природы сорбента, среды реагирования, температуры, примесей и т.п. [1].

Детально сухие методы десульфуризации изложены в [1, 2]. К таким методам относятся следующие: ввод сорбента в топку котла; ввод сорбента в область экономайзера; ввод сорбента в газоход котла и т.д.

Но все эти методы применялись и изучались для подавления SO_2 при работе мощных энергетических котлов. При эксплуатации котла КСВа-2,9Р и других котлов малой мощности часть этих способов практически не применима, а часть не может дать существенного эффекта из-за снижения абсолютных величин параметров, которые входят в формулу (1).

В данной статье рассматриваются сухие методы десульфуризации, применимые для котлов подобного типа, и результаты по снижению концентрации SO_2 в случае их применения.

Как видно из лабораторного анализа угля (см. выше), содержание серы в сжигаемом угле на рабочую массу составляет 3,5 %. При проведении экологических измерений на работающем котле КСВа-2,9Р ст. № 1 перед проведением экспериментов по проверке методов десульфуризации диапазон концентрации диоксида серы составлял 7615–8778 мг/м³ (в среднем на протяжении всего времени сгорания угля – 8299 мг/м³) в пересчете на нормальные условия и при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. (Анализ производился от момента полной загрузки топлива в топливный бункер котла до его полного сгорания через каждые 8–10 мин).

Таким образом, реальное содержание серы в угле, по результатам газового анализа, можно подсчитать по упрощенной зависимости:

$$M_s = 100 (V_{сг} C_{SO_2}) / 1000000, \% \quad (2)$$

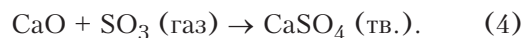
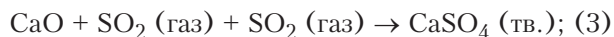
где M_s – содержание серы в угле на рабочую массу, %; $V_{сг}$ – объем сухих дымовых газов, м³/кг топлива (для газовых углей Львовско-Волынского бассейна $V_{сг} = 6,23$) [3]; C_{SO_2} – концентрация диоксида серы, приведенная к н.у. и $\alpha = 1,0$ мг/нм³.

Для условий, при которых проводились замеры, содержание серы в угле находилось в диапазоне 4,74–5,47 %.

Сорбентом, с помощью которого проверялся эффект снижения SO_2 во всех экспериментах, служила негашеная известь (CaO).

Первым методом сухой десульфуризации, который был подвергнут проверке, являлся ме-

тод ввода сорбента в топку котла. Механизм этого метода, согласно [1], можно представить как реагирование SO_2 , а также малого количества SO_3 на поверхности частичек CaO с образованием $CaSO_4$:



На рис.3 представлена схема химического процесса, который протекает по этому методу. Реакции образования сульфита кальция (3) и (4) экзотермические. Они проходят на поверхности частичек CaO. Поэтому частички сорбента должны иметь развитую поверхность и быть малого размера [1].

Учитывая конструкцию и технические характеристики водогрейного котла типа КСВа теплопроизводительностью 2,9 МВт, практическая проверка эффективности этого способа проводилась при подаче сорбента в дутьевой воздух на всас дутьевого вентилятора. Негашеная известь подавалась непрерывно, равными порциями на протяжении всего времени работы котлоагрегата из расчета мольного соотношения $Ca/S = 2$ (для достижения максимальной эффективности) [4]. Одновременно с подачей сорбента с периодичностью 8–10 мин проводился газовый анализ дымовых газов с целью определения концентрации SO_2 .

Результаты проверки эффективности сухих методов десульфуризации при сжигании угля в водогрейном котле типа КСВа-2,9Р представлены на рис.4 и в таблице.

Как видно из рис.4, концентрация SO_2 снизилась и составляет 6914–8778 мг/м³ (в среднем 7354 мг/м³ на протяжении всего времени сгорания топлива) при пересчете на нормальные условия и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$. Абсолютная величина снижения концентрации составила не больше 11,4 %.

Столь небольшую эффективность этого метода можно пояснить следующими факторами.

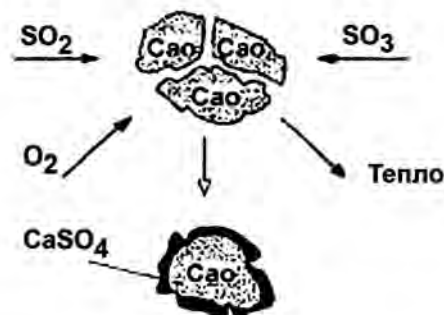


Рис.3. Химические процессы при вводе сорбента в топку.

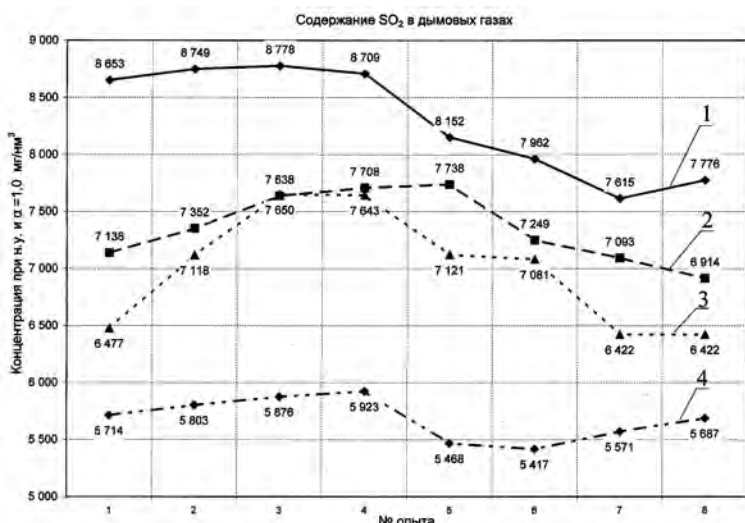


Рис.4. Зависимости концентраций SO_2 от способа ввода сорбента в топку котла КСВа-2,9Р.

В качестве транспортирующего агента для сорбента использовался дутьевой воздух, подаваемый на горение. Конструктивно весь дутьевой воздух подается под подвижную цепную решетку, на которой происходит сжигание угля. Можно предположить, что часть сорбента оседала на нижней части решетки, поэтому он не поступал в ту зону котла, где у него была возможность вступить в реакцию с диоксидом серы.

Поскольку котел КСВа-2,9Р обладает небольшой тепловой мощностью, то его размеры не велики. Это утверждение относится ко всем его конструктивным элементам, включая конвективную часть поверхностей нагрева и длину газоходов. Таким образом, время пребывания в зоне контакта сорбента с диоксидами серы тоже минимально. А, как известно, количество химически связанного диоксида серы напрямую зависит от времени реагирования (1).

По причине отсутствия в котле экономайзера и по причине минимального времени пребывания дымовых газов в газоходе котла ввод сорбента в эти зоны не имел практического смысла.

Следующим этапом по проверке эффективности методов сухой десульфуризации стало добавление сорбента в топливо. Практически этот метод был реализован посредством пересыпания слоев угля, который загружался в топлив-

ный бункер, слоями сорбента CaO . При проверке этого метода было проведено две серии опытов с разным количеством сорбента. В первой серии негашеная известь засыпалась из расчета мольного отношения $\text{Ca}/\text{S} = 1$, а во второй $\text{Ca}/\text{S} = 2$. Как и в случае с подачей сорбента в дутьевой воздух, газовый анализ дымовых газов с целью определения концентраций SO_2 проводился непрерывно, на протяжении всего времени сгорания угля через 8–10 мин. Результаты газового анализа при введении сорбента в топливо также представлены рис.4 и в таблице.

Анализируя приведенную на рис.4 зависимость, можно констатировать, что при использовании в роли сорбента CaO и мольном соотношении $\text{Ca}/\text{S} = 1$ метод дает лишь незначительный эффект. Так, концентрация SO_2 после введения сорбента находилась в пределах 6422–7650 mg/m^3 (в среднем 6992 mg/m^3 на протяжении всего времени сгорания топлива), что составляет в среднем 15,75 % эффективности.

Использование негашеной извести при мольном соотношении $\text{Ca}/\text{S} = 2$ привело к снижению концентрации SO_2 в среднем на 31,5 % (см. рис.4, таблицу), что является неплохим результатом для подобного метода. Кроме того, в удаляемом из котла шлаке были замечены характерные абсорбированные вкрапления серы на поверхности спекшегося сорбента (рис.5).

Увеличить интенсивность процессов десульфуризации возможно при подаче сорбента в уголь. Для этого необходимо обеспечить равномерность распределения CaO при контакте с топливом. При проведении экспериментов такая равномерность соблюдена не была из-за конструкции бункера загрузки и способа подачи угля на цепную решетку. (Бункер имеет трапециевидальную конусоподобную форму, сужающуюся вниз, по направлению к цепной колосниковой решетке. При подаче топлива на решетку под действием силы тяжести в центре бункера образуется воронка, которая приводит к нарушению равно-

Эффективность сухих методов десульфуризации на котле КСВа-2,9Р

Методы десульфуризации	SO_2 , mg/m^3	SO_2 ср, mg/m^3	$ \text{SO}_2 $, %
Исходное состояние	7615–8778	8299	–
Подача сорбента в дутьевой воздух	6914–8778	7354	11,4
Подача сорбента в топливо, мольное соотношение $\text{Ca}/\text{S} = 1$	6422–7650	6992	15,75
Подача сорбента в топливо, мольное соотношение $\text{Ca}/\text{S} = 2$	5417–5923	5682	31,5

Примечание. SO_2 ср – средние значения концентраций SO_2 на протяжении времени выгорания топлива.

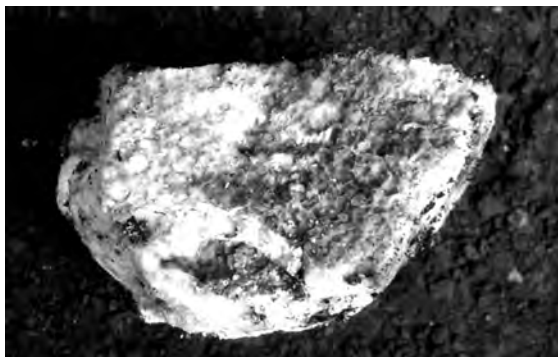


Рис.5. Внешний вид сорбента с вкраплениями серы.

мерности контактирования CaO и сжигаемого угля). На практике условия равномерности контакта можно реализовать, например, установив непрерывный дозатор сорбента между фронтальной плитой котла и выходным отверстием бункера подачи угля. Однако даже при этом эффективность сухого метода применительно к данному типу оборудования вряд ли превысит 50 %.

Выводы

В настоящее время в связи с недостатком в общем балансе угольной отрасли Украины малосернистых углей проблема сжигания высокосернистых углей становится одной из самых острых и возникает на многих промышленных предприятиях.

В целом методы сухой десульфуризации, освоенные на энергетических котлах, не дают возможности применить все разнообразие и добиться более глубокой степени очистки от SO₂ в котлах малой мощности.

Наименее эффективным оказался метод введения сорбента в топку подачей его в дутьевой воздух.

Наиболее эффективным для котлов малой мощности при слоевом сжигании угля (например, для котла типа КСВа-2,9Р) является метод ввода сорбента в топливо в мольном соотношении Ca/S = 2. При этом концентрация диоксидов серы в уходящих газах снизилась в среднем на 31,5 %.

Общими факторами, которые снижают эффективность сухих методов десульфуризации для котлов малой мощности, являются минимальное время контактирования SO₂ и сорбента и замедление процесса связывания диоксидов серы сорбентом из-за невысокого температурного напора (750–800 °С).

Список литературы

1. Вольчин И.А. Сухі методи десульфуризації та теплоенергетика України // Енергетика та електрифікація. — 2010. — № 1. — С. 45–51.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. — М. : Госхимиздат, 1961. — 832 с.
3. Кузнецов Н.В., Митор В.В. и др. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). — М. : Энергия, 1973. — 295 с.
4. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. — Київ : ГНОЗІС, 2013. — 308 с.

Поступила в редакцию 29.09.15

Горбунов О.В.¹, Мігалін С.В.¹, Козирев О.Ю.², Горбунов А.О.³

¹ Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: avgor1968@ukr.net

² ООО «СТИКС-ОІЛ», Київ

вул. Дегтярівська, 25-а, 04119 Київ, Україна, e-mail: kozuryev@mail.ru

³ Національний технічний університет України «КПІ», Київ

просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: gorbunov1994@mail.ua

Сухі методи десульфуризації димових газів при шаровому спалюванні вугілля у водогрійному котлі малої потужності

Розглянуто практичні результати перевірки сухих методів очищення димових газів від діоксиду сірки у котлах малої потужності при шаровому спалюванні вугілля. Проведено аналіз сухих методів придушення SO₂ стосовно спалювання високосірчастого вугілля у котлах малої потужності. Виявлено причини, які обмежують ефективність використовуваних методів десульфуризації. Наведено графіки залежностей концентрацій SO₂ у димових газах від способу введення сорбента у топку котла потужністю

2,9 МВт при шаровому спалюванні газового вугілля. Визначено абсолютні величини зниження концентрації діоксиду сірки у залежності від застосовуваних методів сухої десульфуризації на котлах малої потужності. Дано практичні рекомендації стосовно удосконалення способу подачі сорбента у паливо для досягнення максимальних результатів щодо зниження концентрації діоксиду сірки. *Бібл. 4, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: діоксид сірки, сорбент, десульфуризація, димові гази, водогрійний котел.

Gorbunov O.V.¹, Migalin S.V.¹, Kozyriev O.Yu.², Horbunov A.O.³

¹ The Gas Institute of National of Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

39, Degtyarevskaya Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: avgor1968@ukr.net

² JSC «Stiks-OIL», Kiev

25a, Degtyarevskaya Str, 04119 Kiev, Ukraine, e-mail: kozyryev@mail.ru

³ National Technical University «Kiev Polytechnic Institute», Kiev

37, Peremogy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: gorbunov1994@mail.ua

Application Results of Dry Method Verification for Post-Combustion Capture Control of Sulfur Removal in Low-Power Boilers

Application results of dry method verification for post-combustion capture control of sulfur removal in low-power boilers during coal grate firing are considered. The analysis of dry sulphur dioxide-control method with regard to (for purposes of) high-sulfur coal firing in low-power boilers is performed. The causes limiting the efficiency of applied desulfurization methods are established. Dependence diagrams of stack gas sulphur dioxide concentration from furnace injection method (2,9 MW) during gas coal grate firing are provided. Total values of sulphur dioxide mitigation according to dry flue gas desulfurization used in low-power boilers are defined. Recommended practice for furnace injection improvement in order to minimize to the full sulphur dioxide concentration is provided. *Bibl. 4, Fig. 5, Table. 1.*

Key words: sulphur dioxide, sorbent, desulfurization, stack gas, hot water boiler.

References

1. Vol'chin I.A. [Dry sulphur dioxide-control methods and the heat power industry of Ukraine], *Power Engineering and energization*, 2010, (1), pp. 45–51. (Ukr.)
2. Kasatkin A.G. [Primary processes and chemical engineering equipment], Moscow : Goskhimizdat, 1961, 832 p. (Rus.)
3. Kuznecov N.V., Mitor V.V., Dubovskoj I.E., Karasina Je.S. [Boiler thermal calculation (normative method)], Moscow : Jenergia, 1973, 295 p. (Rus.)
4. Vol'chin I. A., Dunaevs'ka N. I., Gaponich L. S., Chernyavs'kij M. V., Topal O. I., Zasyad'ko Ya. I. [Prospects for clean coal technologies adoption in the power industry of Ukraine], Kiev : GNOSIS, 2013, 308 p. (Rus.).

Received September 29, 2015