

## Оценки снижения выбросов диоксида серы при сжигании канско-ачинских углей в котлах с камерным сжиганием

В.К. Елсуков

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

elswk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6178-1902>

Статья поступила 25.10.2021, принята 09.11.2021

*В работе рассматриваются вопросы снижения выбросов диоксида серы ( $SO_2$ ), образующихся в котлах с камерным сжиганием канско-ачинских углей (КАУ). Рассматриваются физико-химические свойства золошлаковых отходов, образующихся с применением различных технологий камерного сжигания. На основе анализа литературных источников и промышленных исследований, проведенных автором, выделены три группы данных технологий: 1) котлы с твердым шлакоудалением при температурах горения более 1450 К; 2) котлы с твердым шлакоудалением при температурах горения менее 1450 К; 3) котлы с жидким шлакоудалением. Указанное значение температур получено как результат термодинамических расчетов, выполненных ранее в СЭИ [1] (в том числе автором [2]). Рассматриваются результаты промышленных испытаний. На примере водогрейного котла типа КВТК-100-150 показана возможность сжигания КАУ при температурах ниже 1450 К. Сделан вывод о возможности снижения выбросов  $SO_2$ , в том числе дополнительного снижения при использовании всех трех групп технологий, но во второй и третьей — более полно, чем в первой. Выполнен математический анализ кинетического уравнения связывания диоксида серы оксидом кальция. Получены аналитические и графические зависимости концентраций диоксида серы от времени протекания реакции или концентрации оксида кальция. Показана и оценена эффективность рециркуляции золы в верхнюю часть котла с жидким шлакоудалением.*

**Ключевые слова:** технологии сжигания; золоулавливание и золоудаление; котлы; жидкое и твердое шлакоудаление; котлы с кипящим слоем; оксид кальция; соединения серы; термодинамика и кинетика химических реакций.

## Estimates of the reduction of sulfur dioxide emissions during the combustion of Kansk-Achinsk coals in chamber combustion boilers

V.K. Elsukov

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

elswk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6178-1902>

Received 25.10.2021, accepted 09.11.2021

*The paper considers the issues of reducing emissions of sulfur dioxide ( $SO_2$ ) generated in boilers with chamber combustion of Kansk-Achinsk coals (KAC). The physicochemical properties of ash and slag waste generated in various chamber combustion technologies are considered. Based on the analysis of literary sources and industrial research, three groups of the above technologies are identified: 1) boilers with solid slag removal at combustion temperatures more than 1450 K; 2) boilers with solid slag removal at combustion temperatures less than 1450 K; 3) boilers with liquid slag removal. The specified temperature value is obtained by thermodynamic calculations performed earlier in SEI [1] (including the author [2]). The results of industrial tests are considered. On the example of a hot-water boiler of the KVTK-100-150 type, the possibility of burning KAC at temperatures below 1450 K is shown. It is concluded that it is possible to reduce  $SO_2$  emissions, including additional ones, when using all three groups of technologies, but in the second and third — more completely than in the first. A mathematical analysis of the kinetic equation of sulfur dioxide binding by calcium oxide is performed. Analytical and graphical dependences of sulfur dioxide concentrations on the reaction time or the concentration of calcium oxide are obtained. The efficiency of ash recirculation into the upper part of the boiler with liquid slag removal is also shown and evaluated.*

**Keywords:** combustion technologies; ash trapping; ash removal; boilers; liquid and solid slag removal; boilers with a fluidized bed; calcium oxide; sulfur compounds; thermodynamics and kinetics of chemical reactions.

**Введение.** Указанное взаимовлияние может быть важно при совершенствовании технологий сжигания и золоудаления. В частности, актуальными являются вопросы дополнительного использования золошлаковых отходов в топочных технологиях для снижения шлакования поверхностей нагрева [3] и (или)

выбросов загрязнителей окружающей среды [4].

В качестве примера рассмотрим свойства золошлаковых отходов, образующихся при камерном сжигании в котлах с твердым шлакоудалением канско-ачинских углей (КАУ) Ирша-Бородинского месторождения. Вышеотмеченные свойства определяются следующими фак-

торами: 1) геологические условия образования рассматриваемых углей, 2) процессы размола топлива, 3) технологии и особенности сжигания топлива.

Указанные факторы рассматриваются в различных литературных источниках, в том числе в фундаментальной работе А.А. Отса [5]. Однако в отмеченной работе не рассматриваются перспективы снижения выбросов диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) при сжигании КАУ различных месторождений.

**Анализ качества золошлаковых отходов при камерном сжигании энергетических углей на котлах с твердым шлакоудалением.** Отметим наиболее характерные свойства КАУ, определяемые первым фактором. Рассматриваемые угли относятся к малозольным со средней зольностью на сухую массу ( $A^c$ ) от 6 до 12 %. КАУ всех месторождений отличаются малым содержанием серы на сухую массу топлива в пределах от 0,2 до 0,8 %. Примерно по 50 % всей серы приходится на колчеданную и органическую составляющие. Характерной особенностью КАУ является выраженная зависимость химического состава золы от зольности угля. С увеличением  $A^c$  содержание оксидов кремния и алюминия ( $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в золе увеличивается, а содержание оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) снижается. Объясняется это тем обстоятельством, что  $\text{CaO}$  содержится преимущественно в органической массе в виде гуматов кальция, а  $\text{SiO}_2$  вносится с внешними минеральными примесями. В частности, при увеличении  $A^c$  с 6 до 12 % содержание  $\text{CaO}$  в золе снижается примерно линейно от 35 до 17 % (для КАУ Ирша-Бородинского месторождения), а содержание  $\text{SiO}_2$  возрастает примерно от 15 до 55 %.

При размоле топлива в быстроходных мельницах основная его часть распределяется по фракциям от 30 до 100 мкм, что позволяет в дальнейшем эффективно его сжигать в факельных (камерных) топках. Фракционное распределение сопровождается и заметным разделением по фракциям химических элементов. По мере уменьшения размеров частиц (пыли) увеличиваются зольность и содержание в золе «кислотных» компонентов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), а содержание основных компонентов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) уменьшается. Обогащение золой и «кислотными» компонентами мелких фракций пыли объясняется в работе [5] тем, что плотность минеральной части больше плотности органического вещества. По этой же причине в мелких фракциях пыли (и золы) несколько возрастает содержание серы сравнительно с крупными фракциями. В частности, при увеличении фракции пыли от 10 до 100 мкм содержание  $\text{CaO}$  (в золе пыли ирша-бородинского угля) возрастает примерно линейно от 22 до 30 %, а содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  снижается от 15 до 13 %.

Влияние третьего фактора выражается в дополнительном обогащении различных фракций золы различными элементами. Можно выделить три группы технологий, в которых указанное обогащение осуществляется различными технологическими механизмами (процессами): 1) сжигание углей в котлах с твердым шлакоудалением; 2) сжигание углей в котлах с жидким шлакоудалением; 3) сжигание углей в котлах с кипящим слоем.

Неорганические компоненты золы (за исключением

$\text{Ca}$ ) перераспределяются прежде всего из-за изменения их агрегатного состояния, т. е. при высоких температурах в котлах с жидким шлакоудалением. В котлах с твердым шлакоудалением (с малой долей шлакоудаления  $\approx 5$  %) перераспределение этих компонентов менее заметно. Оксид кальция при сжигании КАУ активно сульфатируется, но доля его перехода в сульфат кальция ( $\text{CaSO}_4$ ) заметно меняется в котлах разного типа даже если они включены в одну вышеуказанную группу.

**Промышленные испытания образования соединений серы в котлах с твердым шлакоудалением.** Как отмечалось в работе [6], при температурах сжигания КАУ ниже 1 500 К возможен переход сернистого ангидрида в конденсированный сульфат кальция. Однако термодинамические исследования [6] не рассматривают кинетические условия этого перехода. Следовательно, пока нельзя сказать, в каком виде будут находиться сернистые соединения при низких температурах сжигания ( $< 1$  500 К) в продуктах сгорания КАУ реальных котлов.

Неясным является также вопрос о возможности факельного сжигания топлива при температурах ниже 1 500 К. При факельном сжигании обычно предполагаются более высокие температуры.

С целью уточнения этих вопросов автором были проведены экспериментальные исследования в районной Галачинской котельной (Братск), где установлены два паровых котла типа БКЗ-75-39 и три водогрейных типа КВТК-100-150. На всех пяти котлах сжигается ирша-бородинский бурый уголь. На паровых котлах смонтированы по две шахтные мельницы типа ММТ, а на водогрейных — по четыре мельницы-вентилятора (МВ) с предварительной подсушкой угля топочными газами в нисходящих газоходах.

В ходе исследований с помощью оптического пирометра измерялись температуры в топках водогрейных и паровых котлов. Данные измерений сопоставлялись с замерами выбросов сернистого ангидрида в уходящих газах котлов, выполненными различными организациями.

На рис. 1 и 2 показаны изотермические поля в  $^{\circ}\text{C}$ , снятые в топке водогрейного котла при нагрузке 72 Гкал/ч (81 МВт) и различных сочетаниях трех работающих МВ. Такие режимы являются характерными для водогрейных котлов котельной. Из рисунков следует, что в обоих случаях максимальные температуры на уровне горелок не превышали 1 163  $^{\circ}\text{C}$  (1 436 К). При других нагрузках и режимах работы котлов фиксировались и более высокие максимальные температуры, но такие условия эксплуатации являлись кратковременными.

Невысокие температуры горения, характерные для водогрейных котлов, определялись высокой долей рециркулирующих газов, поступающих в топку через МВ.

Здесь следует отметить, что в котельной имеются проблемы, обусловленные балластированием топки большим количеством рециркулирующих газов при существующей технологии сжигания: повышенный механический недожог ( $q_4 \approx 2$  %), частые пульсации разрежения в топке котла и др.

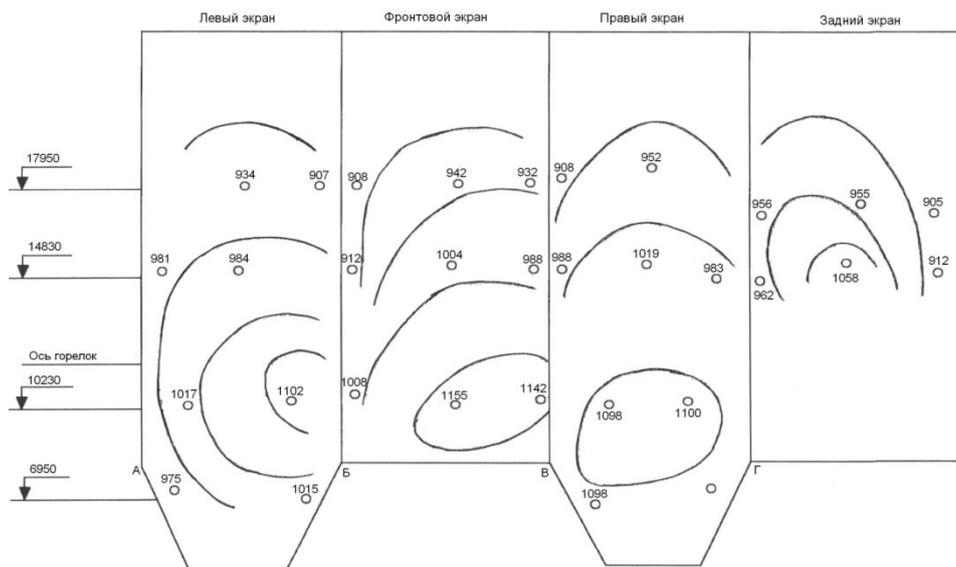


Рис. 1. Распределение температур в топке котла КВТК 100-150 при нагрузке 72 Гкал/ч и работе трех мельниц-вентиляторов (А, Б, Г)

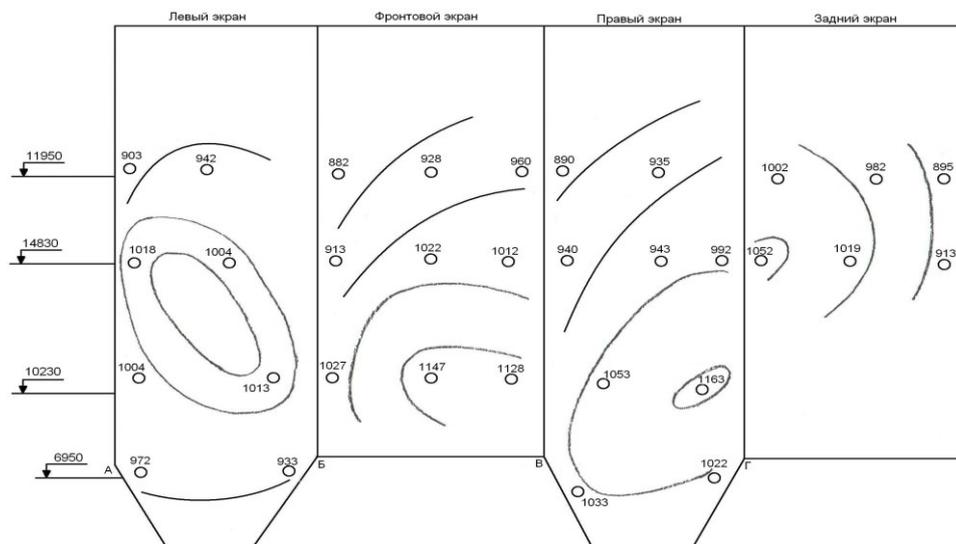


Рис. 2. Распределение температур в топке котла КВТК 100-150 при нагрузке 72 Гкал/ч и работе трех мельниц-вентиляторов (А, Б, В).

На паровых котлах при изменении нагрузки от 60 до 70 т/ч температуры факела были выше соответственно на 50–100 °С. Таким образом, на паровых котлах температурный уровень сжигания в любых режимах примерно на 50 °С и более выше, чем на водогрейных.

По результатам замеров содержания  $SO_2$  в уходящих газах, проведенных в 1990 г. ведомственной (в системе АО «Иркутскэнерго») санитарно-производственной лабораторией получено, что сернистые соединения в газах водогрейных котлов № 3, 4 изменялись от 12 до 65 мг/м<sup>3</sup> и были значительно ниже ПДВ (примерно в 20 раз), а аналогичные соединения в газах паровых котлов № 1, 2 за тот же период изменялись от 33 до 203 мг/м<sup>3</sup> и были также значительно ниже ПДВ. Усредненные за год показатели концентрации соединений серы для водогрейных котлов в 4 раза ниже (33 мг/м<sup>3</sup>), чем те же показатели на паровых котлах (132 мг/м<sup>3</sup>).

Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтверждают расчетные значения температурного перехода  $SO_2$  в  $CaSO_4$ , определенные для состояний конечного равновесия.

К положительным результатам низкотемпературного сжигания следует отнести также отсутствие заметного шлакования поверхностей нагрева на водогрейных котлах, в отличие от паровых. В течение всего отопительного сезона котлы не требуют очистки поверхностей нагрева.

Можно предположить, что ответственными за большую долю связывания сернистых соединений в водогрейных котлах являются процессы, протекающие преимущественно в топках, а не газоходах котлов. Это предположение обосновано тем, что скорости реакций при низких температурах уходящих газов невелики, а время нахождения продуктов горения в газоходах (со-

гласно оценочным расчетам) для обоих типов котлов сопоставимо.

Следует выделить еще одну большую группу котлов, в которых при сжигании КАУ связывается (или возможно связывание) большей части  $SO_2$  в  $CaSO_4$ . Это котлы с жидким шлакоудалением и вихревым движением дымовых газов в топке (типа БКЗ-320-140). В работе [7] авторами показано, что на указанных котлах во время испытаний связывалось около 75 % всего  $SO_2$ , причем процесс связывания протекал в верхней части камеры охлаждения (топки). Высокая доля связывания  $SO_2$  в данном случае обусловлена сочетанием термодинамических и кинетических условий. В верхней части камеры охлаждения процессам связывания благоприятствуют и термодинамические (температура реакции) и кинетические условия (высокая скорость реакции, определяемая вращательным движением газов и большой поверхностью золы, из которой выплавлен кремний, но сохранен оксид кальция).

Отметим некоторые негативные факторы для золоулавливания в электрофильтрах, связанные с низким содержанием диоксида серы в дымовых газах. В публикации [8] применительно к котлам с кипящим слоем приводятся данные о резком снижении поверхностной проводимости золы при низком содержании  $SO_2$  в интервале температур  $\approx 100-200$  °С (сопротивление золы возрастает до  $10^{11}-10^{13}$  Ом·см). По этой причине КПД электрофильтров в указанном диапазоне температур резко снижается. Автором данной работы также фиксировалось существенное изменение электрофизических свойств золы, образующейся при сжигании КАУ в отмеченных водогрейных котлах (КВТК 100-150), приводящее к забиванию циклонных элементов [9]. Следовательно, необходимо проектировать установку электрофильтров таким образом, чтобы избежать зоны максимального сопротивления золы. Представляется целесообразной и другая, двухступенчатая схема золоулавливания: батарейный циклон в качестве первой ступени и тканевый фильтр в качестве второй ступени.

Эффективность дополнительного использования золы требует решения следующих вопросов:

- как изменится температура перехода  $SO_2$  в  $CaSO_4$ ;
- может ли эта зола дополнительно связывать диоксид серы ( $SO_2$ );
- какое количество золы требуется для нужного (заданного) связывания  $SO_2$ .

Первый вопрос можно решить на основе термодинамического моделирования. Следует предположить, что температура перехода повысится.

Ответить на второй вопрос можно из анализа результатов испытаний котлов с кипящим слоем, проведенных отечественными [10] и зарубежными [11] специалистами. В работе [12] отмечается, что степень связывания  $SO_2$  достигает 90 % и более, если частицы известняка имеют размеры  $0,1-0,2$  мм, а мольное отношение Ca/S составляет  $2-3$ . Близкие значения приведены в публикации [13]. (Эти условия соответствуют камерному сжиганию КАУ). В работе А.А. Отса отмечается (на основе анализа термограмм гидротированных проб различных фракций золы назаровского угля КАУ), что вся зола содержит свободный CaO, од-

нако мелкие фракции в меньшем количестве, чем крупные. Таким образом, при благоприятных термодинамических условиях дополнительное использование золы КАУ, например, путем ее рециркуляции в верхнюю часть топки, рекомендованной [14], возможна и целесообразна.

Третий вопрос следует решать путем либо кинетических расчетов, либо физических экспериментов.

**Кинетические исследования.** Результирующая реакция связывания диоксида серы оксидом кальция имеет вид:



Соответственно в ней участвуют 5 молекул, и она имеет дробный порядок 2,5. Для представленной реакции можно составить дифференциальное уравнение:

$$-\frac{dc}{d\tau} = K(C_{CaO}) \cdot (C_{SO_2}) \cdot (C_{O_2})^{0,5}, \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация соответствующих веществ;  $\tau$  — время реакции;  $K$  — константа скорости. Если ввести

параметры  $n = \frac{C_{CaO}}{C_{SO_2}}$ ;  $m = \frac{C_{O_2}}{C_{SO_2}}$ , то (2) запишется в

виде:

$$-\frac{dc}{d\tau} = K \cdot n \cdot m^{0,5} \cdot (C_{SO_2})^{2,5} \quad (3)$$

После интегрирования получим кинетическое уравнение:

$$\tau \cdot K = \frac{C_o^{1,5} - C^{1,5}}{1,5 \cdot n \cdot m^{0,5} \cdot C_o^{1,5} \cdot C^{1,5}}, \quad (4)$$

где  $C$ ,  $C_o$  — соответственно конечная и начальная концентрации вещества ( $SO_2$ ).

На практике обычно измеряют  $C_{SO_2}$  в дымовых газах на выходе из котлов, т. е. конечную концентрацию. Начальную концентрацию можно рассчитать из стехиометрических уравнений горения. Однако использовать уравнение (4) для оценки ( $C_{SO_2}$ ) после каких-либо планируемых мероприятий сложно, поскольку неизвестны четыре параметра:  $k$ ,  $\tau$ ,  $n$ ,  $m$ . Преобразуем (4) для уменьшения числа этих параметров. Введем параметр  $\epsilon$ , представляющий не прореагировавшую долю диоксида серы:

$$\epsilon = \frac{C_{(SO_2)}}{C_{O(SO_2)}}, \quad (5)$$

Учитывая, что на выходе из камерных топок поддерживается избыточное содержание кислорода ( $\alpha_{\tau} \geq 1,2$ ), и его концентрация в зоне реакции меняется сравнительно слабо, можно записать:

$$m \approx \frac{m_o}{\epsilon} \quad (6)$$

Уравнение (4) преобразуется к виду:

$$n = \frac{1 - \epsilon^{1,5}}{1,5 \cdot K \cdot \tau \cdot m_o^{1,5} \cdot C_o^{1,5} \cdot \epsilon} \quad (7)$$

Можно сопоставить два условных режима работы котлоагрегата, в которых в результате каких-либо мероприятий меняется только один параметр (K, τ или n), а другие остаются постоянными:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{K_2}{K_1} = \frac{1 - \epsilon_2^{1,5}}{\epsilon_2} \cdot \frac{\epsilon_1}{1 - \epsilon_1^{1,5}}, \quad (8)$$

где индексы 1 и 2 относятся к сравниваемым режимам.

Вместо параметра (n) может оказаться удобнее использовать параметр (C<sub>CaO</sub>). Тогда (8) преобразуется к виду:

$$\frac{C_{(CaO)2}}{C_{(CaO)1}} = \frac{1 - \epsilon_2^{1,5}}{1 - \epsilon_1^{1,5}} \quad (9)$$

Из полученных уравнений (7), (8) можно оценить, как необходимо изменить один из параметров (C<sub>CaO</sub>), K, τ чтобы получить необходимую величину ε<sub>2</sub> (при известных параметрах 1 режима). Автором по (7), (8) рассчитаны значения  $\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$  и  $\frac{(C_{CaO})_2}{(C_{CaO})_1}$  при трех значениях ε<sub>2</sub> (0,1; 0,25; 0,5). По заданным и рассчитанным значениям построены соответствующие зависимости, представленные на рис. 3.

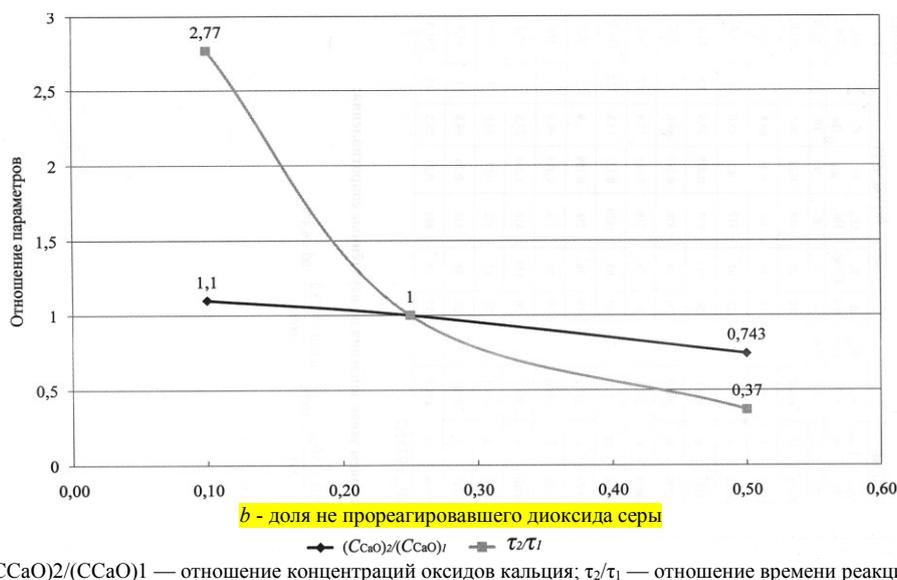


Рис. 3. Зависимости параметров  $\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$  и  $\frac{(C_{CaO})_2}{(C_{CaO})_1}$  от доли не прореагировавшего диоксида серы (ε)

На рис. 3 видно, что зависимость  $\frac{\tau_2}{\tau_1}$  от ε<sub>2</sub> является степенной, а  $\frac{(C_{CaO})_2}{(C_{CaO})_1}$  от ε<sub>2</sub> — близкой к линейной. По

представленным формулам или графическим зависимостям можно оценить эффективность подачи дополнительного количества оксида кальция в верхнюю часть камеры охлаждения котла БКЗ-320-140, что рекомендовано в [14]. Значение ε<sub>1</sub>, зафиксированное в промышленных испытаниях [15], составило 0,25. Концентрация (C<sup>o</sup><sub>CaO</sub>)<sub>1</sub> в топливе в три раза превышает возможную концентрацию диоксида серы (C<sub>SO<sub>2</sub></sub>) и принята равной 3 моля на кг (топлива). После разделения минеральной части в камере сгорания и обогащения золы оксидом кальция его концентрация перед зоной реакции составит, по оценке автора, 2,4 моля (C<sup>o</sup><sub>CaO</sub>)<sub>1</sub>. Конечная концентрация (C<sub>CaO</sub>) в этом режиме составит 1,65 (2,4·0,75). Во втором режиме примем, что вся уловленная в золоуловителе зола направляется (рециркулирует) в зону реакции. Концентрация (C<sup>o</sup><sub>CaO</sub>)<sub>2</sub> на входе в зону реакции во втором режиме составит 4,05 (2,4+1,65), а на выходе из зоны реакции — 3,05 (4,05-

1). Отношения концентраций составляет:

$$\frac{(C^o_{CaO})_3}{(C^o_{CaO})_1} = 1,69 \text{ и } \frac{(C_{CaO})_2}{(C_{CaO})_1} = 1,85.$$

На рис. 3 видно, что параметр ε<sub>2</sub> при полученных значениях стремится к нулю. Конечно, реальное значение ε<sub>2</sub> может оказаться заметно больше расчетного, поскольку свободный оксид кальция в рециркулирующей золе будет находиться в основном внутри частиц золы, и доступ к нему молекул (SO<sub>2</sub>) будет затруднен сравнительно с первым режимом. Однако большое (решающее) влияние дополнительного количества (CaO) на выбросы (SO<sub>2</sub>) должно подтвердиться реальными экспериментами из-за большой пологости соответствующей зависимости (рис. 3).

Таким образом, рекомендованная в [14] рециркуляция золы в верхнюю часть камеры охлаждения котлов с жидким шлакоудалением может быть эффективным мероприятием для уменьшения выбросов SO<sub>2</sub>.

Для оценки других параметров реакции (τ, K) необходимы дополнительные экспериментальные данные, в частности, об изменениях концентрации SO<sub>2</sub> в различных элементах (газоходах) котлов.

## Выводы

1. На примере золы КАУ Ирша-Бородинского месторождения рассмотрены физико-химические свойства золы, образующейся в котлах с твердым шлакоудалением.

2. Факельное сжигание КАУ возможно осуществлять при температурах горения в ядре факела менее 1450 К.

3. Выбросы газообразных сернистых соединений при таких температурах резко снижаются в соответствии с термодинамическими зависимостями и могут быть ниже значений ПДВ.

4. Показана возможность и целесообразность до-

полнительного использования золы КАУ для снижения выбросов  $SO_2$  путем ее рециркуляции в верхнюю часть топki.

5. Показана необходимость учета изменений электрофизических свойств золы, образующейся при сжигании с высокой долей связывания  $SO_2$ .

6. Получены кинетические зависимости параметров реакции связывания  $SO_2$  друг от друга.

7. Оценено влияние изменения количества оксида кальция на выбросы диоксида серы применительно к сжиганию ирша-бородинского угля на котлах с жидким шлакоудалением.

## Литература

- Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. *Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria*. Springer, 2006. 282 p.
- Елсуков В.К. Комплексные исследования эффективности источников энергии в системах централизованного теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2012. 40 с.
- Пивняк Г.Г., Пилов П.И., Пилова Е.П. Снижение выбросов оксида серы при использовании на тепловых электростанциях обогатенного угля // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. № 3 (11). С. 60-65.
- Росляков П.В., Кондратьева О.Е. Перспективы внедрения сероочистки на российских ТЭС при переходе на принципы НДТ // Электрические станции. 2018. № 7 (1044). С. 13-18.
- Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. М.: Энергия, 1977. 312 с.
- Каганович Б.М., Филиппов С.П. Равновесная термодинамика и математическое программирование. Новосибирск: Наука, 1995. 236 с.
- Будилов О.И., Корнев Н.В., Рожков М.А., Соколова Я.И. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании Ирша-бородинского угля в виде пыли высокой концентрации // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. 1991. № 1. С. 61-63.
- Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое: пер. с чешск. / под ред. В.Р. Котлера. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
- Елсуков В.К. Влияние электростатических явлений на эффективность батарейных циклонов типа ЦБР-150У // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 13-18.
- Баскаков А.П. Котлы и топki с кипящим слоем. М.: Энергоатомиздат, 1996. 352 с.
- Reh L. VGB Kraftwerkstechnik. 1976. V. 56. № 8. P. 472-481.
- Meier-Kortwig F.M., Dreher I., Winklhofer P. VGB Kraftwerkstechnik. 1987. V. 67. № 6. P. 559-566.
- Oakes E.J., Engstrom F. Power Engineering. 1982. V. 87. № 3. P. 56-59.
- Elsukov V.K., Latushkina S.V. Features of formation and reduction of sulfur dioxide emissions when burning brown coal in boilers with liquid slag removal. E3S Web of Conferences 209, 03012 (2020) ENERGY-21. Published online: 23 November 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903012>.
- Елсуков В.К., Латушкина С.В. Трансформация и снижение выбросов диоксида серы при сжигании канско-ачинских углей на котлах с жидким шлакоудалением // Системы Методы Технологии. 2019. № 4 (44). С. 61-65.

## References

- Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. *Thermodynamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria*. Springer, 2006. 282 p.
- Elsukov V.K. Comprehensive studies of the efficiency of energy sources in Central heating systems: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Irkutsk, 2012. 40 p.
- Pivnyak G.G., Pilov P.I., Pilova E.P. Reduction of sulfur oxide emissions when using enriched coal at thermal power plants // MODERN SCIENCE: Researches, Ideas, Results, Technologies. 2012. № 3 (11). P. 60-65.
- Roslyakov P.V., Kondrat'eva O.E. Prospects for the introduction of sulfur dioxide at Russian thermal power plants in the transition to BAT principles // Electrical stations. 2018. № 7 (1044). P. 13-18.
- Ots A.A. Processes in steam generators during combustion of oil shale and Kansk-Achinsk coals. M.: Energiya, 1977. 312 p.
- Kaganovich B.M., Filippov S.P. Equilibrium thermodynamics and mathematical programming. Novosibirsk: Nauka, 1995. 236 p.
- Budilov O.I., Korenev N.V., Rozhkov M.A., Sokolova YA.I. Reduction of emissions of harmful substances at burning of Irsha-Borodino coal in the form of dust of high concentration // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 1991. № 1. P. 61-63.
- Kubin M. Solid fuel combustion in a fluidized bed: per. s cheshsk. / pod red. V.R. Kotlera. M.: Energoatomizdat, 1991. 144 p.
- Elsukov V.K. Influence of the electrostatic phenomena on the efficiency of the battery cyclones of CBR-150U type // Industrial Power Engineering. 2009. № 2. P. 13-18.
- Baskakov A.P. Boilers and furnaces with a fluidized bed. M.: Energoatomizdat, 1996. 352 p.
- Reh L. VGB Kraftwerkstechnik. 1976. V. 56. № 8. P. 472-481.
- Meier-Kortwig F.M., Dreher I., Winklhofer P. VGB Kraftwerkstechnik. 1987. V. 67. № 6. P. 559-566.
- Oakes E.J., Engstrom F. Power Engineering. 1982. V. 87. № 3. P. 56-59.
- Elsukov V.K., Latushkina S.V. Features of formation and reduction of sulfur dioxide emissions when burning brown coal in boilers with liquid slag removal. E3S Web of Conferences 209, 03012 (2020) ENERGY-21. Published online: 23 November 2020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020903012>.
- Elsukov V.K., Latushkina S.V. Transformation and reduction of sulfur dioxide emissions during the burning of Kansk-Achinsk coal in boilers with liquid slag removal // Systems Methods Technologies. 2019. № 4 (44). P. 61-65.