

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311.22

DOI:10.18324/2077-5415-2019-4-61-65

### Трансформация и снижение выбросов диоксида серы при сжигании канско-ачинских углей на котлах с жидким шлакоудалением

В.К. Елсуков<sup>a</sup>, С.В. Латушкина<sup>b</sup>

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

<sup>a</sup>elswk@mail.ru, <sup>b</sup>latushkinas@rambler.ru

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

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8635-8959>

Статья поступила 10.10.2019, принята 01.11.2019

*Отмечено, что выявление и уточнение факторов, повышающих эффективность котлов с жидким шлакоудалением, могут быть востребованы как на многих действующих ТЭС, так и при разработке новых технологий сжигания. В данной работе авторами анализируется многолетний опыт сжигания канско-ачинских углей (КАУ) на ТЭЦ-6 Братска в котлах типа БКЗ-320-140 ПТ. Представлены результаты термодинамических и промышленных исследований, в том числе проведенных авторами, в ходе которых изучался переход диоксида серы (SO<sub>2</sub>) в сульфат кальция при сжигании КАУ. Как показывает анализ существующей технологии сжигания угля в котлах с жидким шлакоудалением, при сжигании КАУ Ирша-Бородинского месторождения основная часть серы топлива (≥ 75 %) переходит в сульфат кальция в камере охлаждения котлов. При сжигании КАУ других месторождений указанное значение может существенно меняться. Выявлено, что выбросы SO<sub>2</sub> возрастают с увеличением нагрузки котла, при избытке воздуха и зависят также от количества и сочетания пылесистем. Сделан вывод о необходимости дополнительного термодинамического и технического анализа результатов представленных исследований для последующей разработки мероприятий по снижению выбросов диоксида серы. Предложен механизм перехода диоксида серы в сульфат кальция для условий эксплуатации котлов с жидким шлакоудалением. Предлагаются режимные и конструктивные мероприятия для уменьшения выбросов диоксида серы.*

**Ключевые слова:** котлы с жидким шлакоудалением; сульфат кальция; диоксид серы; избыток воздуха; нагрузка котла; пылесистемы; выбросы загрязнителей; термодинамическое моделирование процессов сжигания.

### Transformation and reduction of sulfur dioxide emissions when burning Kansk-Achinsk coal in boilers with liquid slag removal

V.K. Elsukov<sup>a</sup>, S.V. Latushkina<sup>b</sup>

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

<sup>a</sup>elswk@mail.ru, <sup>b</sup>latushkinas@rambler.ru

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

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8635-8959>

Received 10.10.2019, accepted 01.11.2019

*It is noted that the identification and clarification of factors increasing the efficiency of boilers with liquid slag removal can be in demand both at many existing thermal power plants and in the development of new combustion technologies. In this paper, the long-term experience of burning Kansk-Achinsk coal (KAC) at the Bratsk Thermal Power Plant (TPP-6) in boilers typed BKZ-320-140 PT is analyzed. The results of thermodynamic and industrial studies of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) transition to calcium sulfate in the combustion of Kansk-Achinsk coal (KAC) carried by various researchers including the authors are investigated. Based on a review of the existing technology for burning coal in boilers with liquid slag removal, it is shown that when KAC of the Irsha-Borodinsky deposit is burned in boilers with liquid slag removal, most of fuel sulfur (≥75%) is converted to calcium sulfate in the boiler cooling chamber in accordance with thermodynamic studies. When burning KAC of other deposits, this value may vary significantly. It has been found that SO<sub>2</sub> emissions increase with an increasing boiler load and excess air and also depend on other operational factors, such as the number of vacuum systems and their combinations. It is concluded that to reduce sulfur dioxide emissions, there is a need for additional thermodynamic and technical analysis of the results of the presented studies for the subsequent development of measures. A mechanism for the transition of sulfur dioxide to calcium sulfate for the operating conditions of boilers with liquid slag removal is proposed. Mode and constructive measures are proposed for reducing sulfur dioxide emissions.*

**Keywords:** boilers with liquid slag removal; calcium sulfate; sulfur dioxide; excess air; boiler load; dust-forest systems; pollutant emissions; thermodynamic modeling of combustion processes.

**Введение.** Выявление и уточнение факторов, повышающих эффективность котлов с жидким шлакоудалением, может быть востребовано как на многих действующих ТЭС, так и при разработке новых технологий сжигания. В данной работе авторами анализируется многолетний опыт сжигания канско-ачинских углей (КАУ) на ТЭЦ-6 Братска в котлах типа БКЗ-320-140 ПТ, включая успешные модернизации технологий сжигания КАУ Ирша-Бородинского месторождения, в результате которых были существенно снижены выбросы оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) [1], а также экспериментальные исследования, в ходе которых в различных точках котла замерялись концентрации  $\text{NO}_x$ , диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), бенз[а]пирена (БаП) и другие технико-экономические параметры [1; 2]. Публикациям [1; 2] предшествовали внутриванционные отчеты различных организаций (по результатам экспериментальных работ, техархив ТЭЦ-6), в том числе заключение среднеазиатского филиала (САФ) ВНИИПРОМ ГАЗ «Определение концентраций бенз[а]пирена и других токсичных веществ в дымовых газах котлов Иркутской ТЭЦ-6» (Я.И. Соколова, М.А. Рожков, 1989 г., с. 41).

Все значения различных параметров, представленные в указанном заключении и публикациях [1; 2], совпадают, за исключением концентраций  $\text{SO}_2$ . В отчете ВНИИПРОМ ГАЗ концентрации  $\text{SO}_2$  в уходящих газах при сжигании КАУ Ирша-Бородинского месторождения составляют  $\approx 100\text{--}150 \text{ мг/м}^3$ , а в публикации [1]  $\approx 330 \text{ мг/м}^3$ . Отличия представленных значений  $\text{SO}_2$  объясняются сомнениями авторов [1] в надежности методики определения  $\text{SO}_2$ . К настоящему моменту имеются многочисленные измерения  $\text{SO}_2$ , проведенными на станции различными организациями, в которых при сжигании Ирша-Бородинского угля всегда фиксировались выбросы  $\text{SO}_2$  менее  $200 \text{ мг/м}^3$ . С учетом этих измерений в данном исследовании приводятся значения  $\text{SO}_2$  из вышеуказанного заключения как более представительные сравнительно с [1].

При анализе экспериментальных данных авторами этой работы использовались результаты термодинамических расчетов сжигания КАУ, проведенных в Сибирском энергетическом институте (СЭИ, ныне ИСЭМ) [3; 4], в том числе автором [5].

Проблемы снижения выбросов сернистых соединений при сжигании твердых и жидких топлив продолжают оставаться актуальными и в настоящее время [6–9].

В ряде кинетических исследований установлено [6], что при недостатке воздуха серосодержащие продукты сгорания мазута состоят из  $\text{H}_2\text{S}$ , S, SH, SO,  $\text{SO}_2$ , причем концентрация оксидов серы стремится к нулю. При стехиометрических условиях сера в основном представлена в виде SO и  $\text{SO}_2$ , и в системе появляются следы серного ангидрида. При  $\alpha > 1$  преобладают высшие оксиды серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ . Как отечественные [10; 11], так и зарубежные исследователи считают, что окисление сернистого ангидрида в серный составляет для котельных агрегатов 0,2–2,5 %.

При сжигании твердого топлива, содержащего оксиды щелочных металлов, могут протекать реакции типа:



Применительно к сжиганию КАУ эта реакция до последнего времени практически не исследовалась. Это можно объяснить тем, что при сжигании КАУ в традиционных топочных устройствах, при соответствующих режимных параметрах, образование конденсированного гипса происходило лишь в незначительной степени, т. е. равновесие реакции (1) было смещено влево. Имеется мнение, что реакция образования гипса протекает преимущественно в газоходах котла при низких температурах. Это положение заложено в методику определения выбросов сернистых соединений от котлов [12; 13].

Однако в связи с развитием в последние годы технологий низкотемпературного сжигания твердого топлива вышеуказанный подход может привести к большим неточностям или ошибкам. Поэтому становится необходимой точная информация об условиях протекания реакции (1) применительно к сжиганию КАУ. При проведении термодинамических исследований горения КАУ авторы установили [3–5], что в состоянии термодинамического равновесия вся сера топлива переходит в  $\text{CaSO}_4$  при  $T < 1400 \text{ К}$  и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ ; переход начинается при  $T \approx 1500 \text{ К}$ .

Полученные результаты имеют важное значение, поскольку такие условия горения подходят не только к котлам с кипящим слоем, но и к некоторым технологиям факельного сжигания твердого топлива, которые будут рассмотрены ниже. Из этого следует, что в принципе можно добиться значительного снижения выбросов серы от котлов при использовании соответствующих технологий сжигания без применения дорогостоящих десульфуризационных установок.

Установленные при термодинамических исследованиях параметры перехода газообразного сернистого ангидрида в гипс требуют экспериментального подтверждения. Важно также понять, от чего зависят термодинамические ограничения области указанного перехода с целью получения возможности повышения температуры образования гипса и расширения при этом круга соответствующих технологий сжигания.

**Технологии сжигания, реализованные на котлах.** Котел оборудован четырьмя индивидуальными пылесистемами с промбункером. Сушка и транспорт пыли в системе пылеприготовления осуществляется смесью «горячих» и «холодных» дымовых газов. На котлах смонтировано 16 систем подачи и сжигания пыли высокой концентрации под разрежением (ПВКР), включая пылепроводы, паровые эжекторы и горелки. Причем на каждую из 8 основных горелок (рис. 1) заведено по два пылепровода. В вышеуказанных работах [1; 2] рассматриваются эксперименты, проведенные на различных котлах (котельных агрегатах, к. а.) станции, в том числе на к. а. ст. № 5 и 7. К. а. № 5 был оснащен двумя (замкнутыми (Б, В) и двумя разомкнутыми пылесистемами (п. с.), а на к. а. № 7 (и других котлах) все пылесистемы замкнутые (рис. 2). Для нашего дальнейшего анализа важно отметить, что сбросы сушильного агента замкнутых пылесистем заведены в верхнюю часть камеры горения над основными горелками, а

разомкнутых пылесистем А и Г (к. а. № 5) — в газод перед батарейными циклонами.

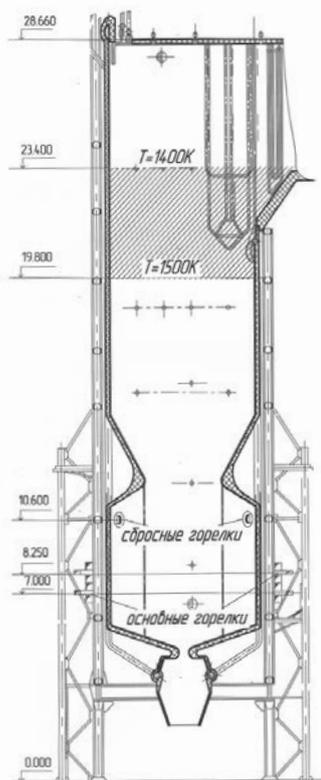


Рис. 1. Топка котла БКЗ-320-140ПТ

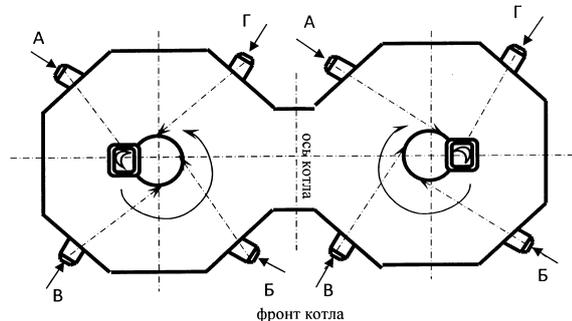


Рис. 2. Схема камеры горения в плане (А–Г — подвод сбросных газов от соответствующих пылесистем)

Топка к. а. (рис. 1) разделена выступами фронтального и заднего экранов на камеры горения и охлаждения протяженностью соответственно  $\approx 6,3$  и  $19$  м. Камера охлаждения имеет прямоугольное сечение, а камера горения — сечение двух сообщающихся восьмигранников (рис. 2). На боковых гранях этих восьмигранников установлены двухъярусные горелки, оси которых направлены по касательной к воображаемым окружностям диаметрами по  $0,98$  м. Таким образом, камера горения включает два предтопка, в которых образуются «циклонные» вертикальные факелы.

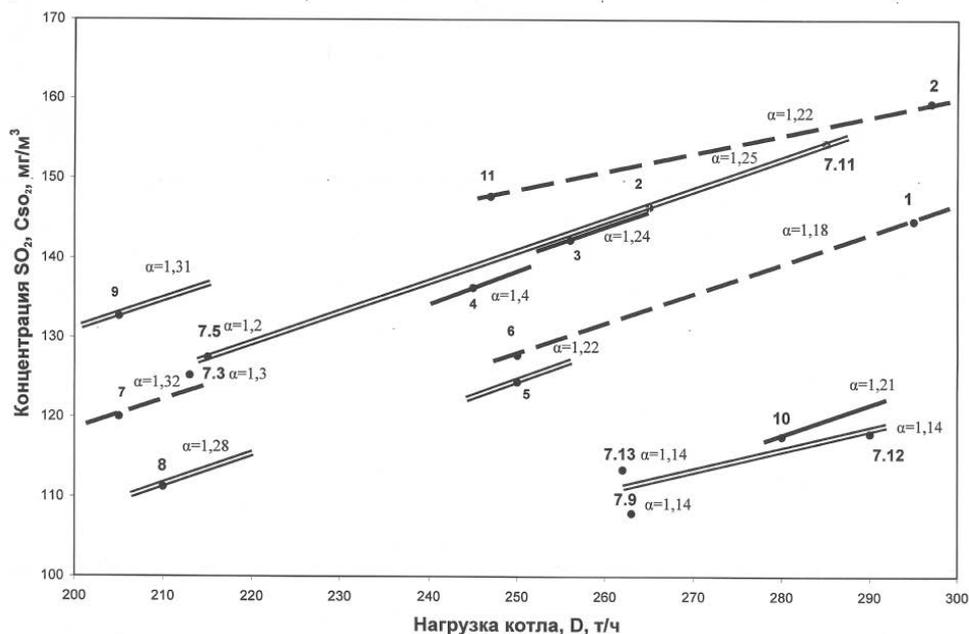
Концентрации загрязнителей определялись по методикам САФ ВНИИпромгаз.

Примерно с 2005 г. на станции стали сжигать КАУ малых месторождений (Канского, Ирбейского и др.). Использование КАУ этих месторождений привело к резкому увеличению выбросов основных газообразных загрязнителей —  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ . Целью данной работы является анализ экологических характеристик процессов сжигания КАУ и выявление технических решений по снижению выбросов всех основных загрязнителей, включая  $\text{SO}_2$ .

**Результаты испытаний.** Для выявления новых закономерностей образования загрязнителей рассмотрим результаты испытаний к. а. № 5 и 7, изложенные в вышеуказанном заключении, с учетом аэродинамики вихревых процессов. Результаты представим в виде зависимости концентраций  $\text{SO}_2$  от нагрузки котла (рис. 3). Каждая линия соответствует определенным работающим п. с., а номера точек — номерам опытов. Номера из одного числа относятся к к. а. № 5, а номера из двух чисел, первое из которых 7, — к к. а. № 7. На к. а. № 5 было проведено 11 опытов, в которых менялись работающие пылесистемы, а также варьировались  $\alpha_{\text{пп}}$  и  $G_{\text{п}}$  (расходы пара на эжекторы), все они отражены на рис. 3. На к. а. № 7 было проведено 18 опытов, 4 из которых, для возможности сопоставления с к. а. № 5, представлены на рис. 3. Концентрации  $\text{SO}_2$  замерялись на выходе из топки. Все значения уточнены авторами данной работы для стандартных условий, определяемых при избытке воздуха в уходящих газах ( $\alpha_{\text{yx}}$ ) 1,4.

На рис. 1 показана (заштрихована) область, в которой дымовые газы имеют вышеуказанные температуры. Отмеченные на рис. 1 линии температур газов построены по литературным данным [1] и соответствуют нагрузке котла  $D = 300$  т/ч и  $\alpha_{\text{пп}} = 1,3$ . Отметим некоторые положения эксплуатации к. а., важные для дальнейшего анализа. При вводе в камеру горения газообразных рабочих тел (водяных паров, воздуха и др.) температура в камере горения снижается, а на выходе из камеры охлаждения — повышается. Такой результат регистрировался при испытаниях [1] и объясняется уменьшением времени нахождения продуктов сгорания в камере охлаждения. На рис. 3 представлены результаты замеров содержания  $\text{SO}_2$  в дымовых газах в зависимости от нагрузки ( $D$ ), избытка воздуха за пароперегревателем ( $\alpha_{\text{пп}}$ ) и сочетания работающих пылесистем. Из анализа полученных характеристик следует, что выбросы  $\text{SO}_2$  не превышают  $143 \text{ мг/м}^3$  (соответствует коэффициенту связывания оксидов серы минеральной частью топлива  $\geq 75\%$ ). Величина  $\text{SO}_2$  почти в 1,5 раза снижается с уменьшением нагрузки от 297 до 205 т/ч. Заметно влияет на выбросы  $\text{SO}_2$  и значение  $\alpha_{\text{пп}}$ : с уменьшением  $\alpha_{\text{пп}}$  снижаются и выбросы  $\text{SO}_2$  при прочих постоянных параметрах.

**Механизм перехода диоксида серы в сульфат кальция.** Представленные зависимости можно объяснить следующими обстоятельствами.



**Рис. 3.** Зависимость концентрации диоксида серы от нагрузки котла, числа работающих пылесистем и их сочетания, избытка воздуха (==== — в топку сбрасываются газы от двух пылесистем; — — в топку сбрасываются газы от одной пылесистемы; — — отсутствует сброс в топку сушильных агентов)

Скорость прямой реакции (1) будет наибольшей при максимальной температуре, т. е. в интервале 1400–1500 К. Чем больше времени дымовые газы будут находиться при указанных температурах, тем выше будет коэффициент связывания оксидов серы.

Сравнительно медленно дымовые газы движутся в камере охлаждения, где преимущественно и протекает реакция (1). Затем в конвективных газоходах скорость газов увеличивается, а температура снижается. Соответственно, резко снижается скорость реакции (1). Следовательно, чем раньше дымовые газы в камере охлаждения охладятся до 1500 К, тем больше будет время протекания реакции (1) и выше коэффициент связывания оксидов серы.

Известно, что при увеличении нагрузки котла температуры газов во всем объеме топочной камеры возрастают. Это приводит к уменьшению коэффициента связывания  $SO_2$ . То же происходит при увеличении  $\alpha_{\text{пл}}$  в дымовых газах (при увеличении расхода дутьевого воздуха в камеру горения и уменьшении времени нахождения продуктов сгорания в камере охлаждения).

Влияние количества пылесистем на протекание реакции (1) неоднозначно. С одной стороны, при включении двух пылесистем увеличиваются вращательная составляющая движения газов, их турбулизация и скорость реакции (1). С другой стороны, увеличение расхода дымовых газов (при увеличении количества пылесистем) приводит к росту их температур в камере охлаждения, что уменьшает время реакции в камере охлаждения. Так, выбросы  $SO_2$  в опыте 10, при работе одной пылесистемы, заметно ниже, чем в опытах 11 и 2 при отключенных пылесистемах. Однако включение двух пылесистем (например, 7.16) опять повышает выбросы  $SO_2$  до значений опыта 11.

С учетом изложенного анализа можно предложить следующие мероприятия по уменьшению выбросов  $SO_2$ . Избыточный воздух следует подавать не в камеру сгора-

ния, а в камеру охлаждения, чтобы температура газов после смешивания с воздухом составила 1500 К. Это увеличит время реакции (1) и, соответственно, коэффициент связывания  $SO_2$ . Сжигать топливо в камере сгорания следует при  $\alpha_{\text{к.с.}} \approx 1,015 \pm 0,05$ . Предлагаемое мероприятие является частным случаем технологии ступенчатого сжатия и, конечно, требует дополнительной реконструкции воздухопроводов.

#### Выводы.

1. На основе проведенного анализа термодинамических и промышленных исследований предложен механизм перехода диоксида серы в сульфат кальция при сжигании КАУ в котлах с жидким шлакоудалением.

2. Показано, что при сжигании КАУ в котлах с жидким шлакоудалением большая часть серы топлива ( $\geq 75\%$ ) переходит в сульфат кальция в камере охлаждения котлов в соответствии с термодинамическими исследованиями.

3. Выявлено, что выбросы  $SO_2$  возрастают с увеличением нагрузки котла и избытков воздуха.

4. Число работающих пылесистем сложным образом влияет на выбросы  $SO_2$ . С одной стороны, увеличение этого числа ведет к росту расхода дымовых газов и уменьшению времени перехода  $SO_2$  в  $CaSO_4$ , с другой стороны, при этом увеличивается турбулизация процессов горения, что ускоряет вышеуказанный переход.

5. Предложены режимные и конструктивные мероприятия для уменьшения выбросов диоксида серы.

#### Литература

1. Будилов О.И., Загорин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. Томск: Красное знамя, 1994. 100 с.

2. Будилов О.И., Рожков М.А., Соколова Я.И. Снижение выбросов вредных веществ при сжигании Ирша-бородинского угля в виде пыли высокой концентрации // Изв. вузов. Энергетика. 1991. № 1. С. 61–63.
3. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Ширкалин И.А., Зароднюк М.С. Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя. Новосибирск: Наука, 2010. 236 с.
4. Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. Termodinamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria. Springer, 2006. 282 p.
5. Елсуков В.К. Комплексные исследования эффективности источников энергии в системах централизованного теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2012. 40 с.
6. Кудрявцев Н.Ю., Кейко А.В., Шаманский В.А., Ширкалин И.А., Зароднюк М.С. Перспективы снижения выбросов оксидов серы в атмосферу при сжигании органических топлив // Теплоэнергетика. 1995. № 2. С. 6–11.
7. Пивняк Г.Г., Пилов П.И., Пилова Е.П. Снижение выбросов оксида серы при использовании на тепловых электростанциях обогащенного угля // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Днепропетровск, 2012. № 3(11). С. 60–65.
8. 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.
9. Халид Эль-Шейх, Рябов Г.А., Бухарина Т.В. Особенности образования и подавления выбросов оксидов серы при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO<sub>2</sub> // Электрические станции. 2019. № 8(1057). С. 18–24.
10. Аверин А.А., Кудрявцев Н.Ю., Усов А.В. Образование серного ангидрида в дымовых газах паровых котлов при сжигании сернистого мазута // Теплоэнергетика. 1994. № 1. С. 66–71.
11. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справочник: пер с англ. В 2 т. / под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. М.: Металлургия, 1988. Т. 2. 712 с.
12. Методика определения валовых выбросов вредных веществ в атмосферу от котлов тепловых электростанций. МТ 34-70-0130-83. М.: СПО «Союзтехэнерго», 1984, 18 с.
13. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. РД 34.02.305 – 98. М.: АООТ ВТИ. 1998. 40 с.
2. Budilov O.I., Rozhkov M.A., Sokolova Y.A.I. Reduction of emissions of harmful substances at burning of Irsha-Borodino coal in the form of dust of high concentration // Izv. vuzov. Energetika. 1991. № 1. P. 61–63.
3. Kaganovich B.M., Kejko A.V., Shamanskij V.A., Shirkalin I.A., Zarodnyuk M.S. Technology of thermodynamic modeling. Reduction of motion models to rest models. Novosibirsk: Nauka, 2010. 236 p.
4. Gorban A.N., Kaganovich B.M., Filippov S.P., Keiko A.V., Shamansky V.A., Shirkalin I.A. Termodinamic Equilibria and Extrema Analysis of Attainability Regions and Partial Equilibria. Springer, 2006. 282 p.
5. 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.
6. Kudryavcev N.YU., Kejko A.V., Shamanskij V.A., Shirkalin I.A., Zarodnyuk M.S. Prospects for reducing emissions of sulfur oxides into the atmosphere when burning organic fuels // Thermal Engineering. 1995. № 2. P. 6–11.
7. Pivnyak G.G., Pilov P.I., Pilova E.P. Reduction of sulfur oxide emissions when using enriched coal at thermal power plants // Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii. Dnepropetrovsk, 2012. № 3(11). P. 60–65.
8. 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.
9. Halid El'-SHejh., Ryabov G.A., Buharina T.V. Features of formation and pressure of emissions of sulfur oxides at combustion of fuels in the environment of oxygen with CO<sub>2</sub> recirculation // Electrical stations. 2019. № 8(1057). P. 18–24.
10. Averin A.A., Kudryavcev N.YU., Usov A.V. Formation of sulfur anhydride in flue gases of steam boilers during combustion of sulfur fuel oil // Thermal Engineering. 1994. № 1. P. 66–71.
11. Protection of the atmosphere from industrial pollution: per s angl. V 2 t. / pod red. S. Kalverta, G.M. Inglunda. M.: Metallurgiya, 1988. Vol. 2. P. 712.
12. Method of determination of gross emissions of harmful substances into the atmosphere from boilers of thermal power stations. МТ 34-70-0130-83. М.: SPO «Soyuztekhenergo», 1984, 18 p.
13. Method of determination of gross emissions of polluting substances into the atmosphere from boiler plants of thermal power plants TES. RD 34.02.305-98. М.: АООТ ВТИ. 1998. 40 p.

#### References

1. Budilov O.I., Zavorin A.S. Experience of improvement of ecological characteristics of thermal power plant. Tomsk: Krasnoe znamya, 1994. 100 p.