



ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ

ENERGY AND ECOLOGY

ПРОБЛЕМЫ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ТЭС

PROBLEMS OF UNHEALTHY ATMOSPHERIC EMISSIONS BY THERMAL POWER PLANT

Статья поступила в редакцию 10.11.17. Ред. рег. № 2632

The article has entered in publishing office 10.11.17. Ed. reg. No. 2632

УДК 665:669.775

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В ТОПЛИВЕ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ
РАБОТЫ КОТЛОВ ПРИ СЖИГАНИИ НЕПРОЕКТНЫХ
ВИДОВ ТОПЛИВА***

**Н.А. Зройчиков¹, А.О. Перфильев², А.М. Грибков³,
В.Я. Путилов⁴, Д.В. Горбуров⁵**

¹Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского
д. 19, просп. Ленинский, Москва, 119071, Россия
тел./факс: +7(495)310-86-55; e-mail: zna@eninnet.ru

²ООО «Эн+ Менеджмент»

д. 1, ул. Василисы Кожиной, Москва, 121096, Россия
тел./факс: +7(914)895-23-04; e-mail: s-h-r-k@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет «КГЭУ»
д. 51, ул. Красносельская, Казань, 420066, Россия
тел./факс: +7(495)310-86-55; e-mail: gribkova@mail.ru

⁴ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
информационно-аналитический центр «Экология энергетики» (ИАЦЭЭ МЭИ)
д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел./факс: +7(495)362-79-12; e-mail: putilovaiv@esopower.ru

⁵ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия
тел./факс: +7(903) 790-29-32; e-mail: exergo@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.01-03.103-117

Заключение совета рецензентов: 23.11.17 Заключение совета экспертов: 06.12.17 Принято к публикации: 25.12.17

Приведены краткие сведения о коррозионно-агрессивных соединениях серы в тракте пылеугольного котла. При сгорании угля с повышенным содержанием серы образуется сернистый ангидрид (SO₂) и серный ангидрид (SO₃). По мере движения продуктов сгорания по конвективной шахте котла их температура снижается и достигает значений начала конденсации серной и сернистой кислоты. В статье описан экономичный и достаточно простой по исполнению эксперимент, позволяющий определить мероприятия по уменьшению низкотемпературной коррозии низкотемпературных поверхностей нагрева (НТПН).

В рамках исследования методов повышения энергетической и экологической эффективности работы оборудования и на основе анализа результатов промышленных испытаний различных способов снижения выбросов оксидов серы при сжигании непроектных видов бурого угля выполнена оценка некоторых методов и подготовлены научно-обоснованные технические предложения для достижения минимально возможных концентраций оксидов серы в выбросах с дымовыми газами в атмосферный воздух. При этом учитывался ряд важ-

*Зройчиков Н.А., Перфильев А.О., Грибков А.М., Путилов В.Я., Горбуров Д.В. Исследование влияния содержания серы в топливе на эффективность и экологическую безопасность работы котлов при сжигании непроектных видов топлива // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(01-03):103-117.



ных нормативно-правовых актов, содержащих комплекс мер по переходу на принципы наилучших доступных технологий, и принималась во внимание разработка информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям («Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии») для объектов электроэнергетики. Кроме того, были определены некоторые мероприятия, направленные на повышение надежности и эффективности работы НТПН котлов тепловых электрических станций с точки зрения экологической и экономической целесообразности.

Ключевые слова: котельные установки; бурый уголь; системы пылеприготовления; пылеугольное сжигание; содержание серы в угле; концентрация оксидов серы; водород; состав золы; характеристики сжигаемых углей; сернистая коррозия; наилучшие доступные технологии; водородная энергетика; ТЭС.

STUDY OF THE EFFECT OF SULFUR CONTENT IN FUEL ON EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF BOILER OPERATION IN COMBUSTION OF NON-PROJECTED FUEL

N.A. Zroichikov¹, A.O. Perfil'ev², A.M. Gribkov³, V.Ya. Putilov⁴, D.V. Gorburov⁵

¹G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute (SC "ENIN")

19 Leninsky Ave., Moscow, 119071, Russia

tel./fax: +7 (495) 310 86 55; e-mail: zna@eninnet.ru;

²Ltd "En + Management"

1 Vasilisy Kozhinoy St., Moscow, 121096, Russia

tel./fax: +7(914) 895 23 04; e-mail: s-h-r-k@mail.ru

³FSBEI HPE "Kazan state power engineering university"

51 Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Russia

tel./fax: +7(495)310 86 55; e-mail: gribkovalmi@mail.ru

⁴FSBEI HPE National Research University "MPEI",

Information and Analytic Center "Ecology of Power Engineering" of MPEI (IACEE MPEI)

14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia

tel./fax: +7(495)362 79 12; e-mail: putilovaiv@ecopower.ru

⁵FSBEI HPE National Research University "MPEI"

14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia

tel./fax: +7(903) 790 29 32; e-mail: exergo@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.01-03.103-117

Referred 23 November 2017 Received in revised form 6 December 2017 Accepted 25 December 2017

The paper gives brief information about the corrosion-aggressive sulfur compounds in the pulverized coal boiler path. Sulfur dioxide (SO₂) and sulfuric anhydride (SO₃) are formed when coal burns with increased sulfur content. As the combustion products move along the convective shaft of the boiler, their temperature decreases and reaches the values of the beginning of condensation of sulfurous anhydride and sulfuric anhydride. The paper describes an economical and simple experiment that allows us to determine the measures how reduce low-temperature corrosion of low-temperature heating surfaces (LTHS).

In the study of methods for increasing energy performance and improving the environmental efficiency of equipment and on the basis of analysis the results of industrial tests of various ways to reduce sulfur oxide emissions from the burning of non-projected brown coal species, some methods have been evaluated and scientifically grounded technical proposals have been prepared to achieve the minimum possible concentrations of sulfur oxides in emissions with flue gases into the atmospheric air. At the same time, a number of important legal acts containing a set of measures to switch to the principles of the best available technologies and the development of an information and technical handbook on the best available technologies ("Combustion of fuels in large installations for energy production") have been taken into account for power facilities. In addition, some measures aimed at improving the reliability and efficiency of the operation of the STPP of boilers of thermal power plants have been identified in terms of environmental and economic feasibility.

Keywords: boiler plants; brown coal; dust preparation systems; pulverized coal combustion; sulfur content in coal; concentration of sulfur oxides; hydrogen; ash composition; charcoal characteristics; sulfur corrosion; best available technologies; hydrogen energy; TPP.





Николай Алексеевич
Зройчиков
Nikolay Zroychikov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, академик РАПЭ; заместитель генерального директора по науке Энергетического института имени Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИН»).

Награды: медаль «В память 850-летия Москвы»; серебряная медаль ВДНХ; орден К.Э. Циолковского; медаль ВВЦ «За успехи в научно-техническом творчестве»; орден «Экологический щит России»; орден Петра Великого 1-й степени; заслуженный работник ЕЭС России; заслуженный работник Минтопэнерго России; почетный энергетик Минтопэнерго.

Образование: Московский энергетический институт (1977 г.); Высшая школа управления Государственной академии управления (1995 г.).

Область научных интересов: технологии использования топлива; процессы сжигания органических видов топлива; экология энергетики; аэродинамические схемы тягодутьевых машин и поверхностей нагрева регенеративных подогревателей.

Публикации: более 125, включая монографии, учебные пособия, авторские свидетельства и патенты РФ.

h-index: 7

Сведения об авторе: аспирант Энергетического института имени Г.М. Кржижановского (АО «ЭНИН»), аналитик ООО «Эн+ Менеджмент».

Образование: Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет (2012 г.), Байкальский государственный университет экономики и права (2012 г.).

Награды: благодарность АО «Евросибэнерго» (2014 г.); диплом за победу и лидерские качества от компании ТНК-ВР (2014 г.); лауреат различных премий в области развития топливно-энергетического комплекса; победитель Всероссийских конкурсов.

Область научных интересов: технологии использования топлива; процессы сжигания органических видов топлива; экология энергетики; аэродинамические схемы тягодутьевых машин и поверхностей нагрева регенеративных подогревателей.

Публикации: более 10, включая 1 учебное пособие.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Industrial Ecology (RAIE); Scientific Director of G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute (SC "ENIN").

Awards: Medal "In memory of the 850th anniversary of Moscow"; a silver medal of VDNH; Order of K.E. Tsialkovsky; Medal of VDNH "For achievements in scientific and technical creativity"; Order "Ecological Shield of Russia"; First Class Order of Peter the Great; Honored Worker of UES of Russia; Honored Worker of Fuel and Energy Ministry of Russia; Honorary Power Engineer of the Ministry of Fuel and Energy.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1977; High School of Management of the State Academy of Management, 1995.

Research interests: fuel utilization technologies; fossil fuel combustion processes; ecology of power engineering; aerodynamic schemes of draft machines and heating surfaces of regenerative heaters.

Publications: more than 125 including monographs, textbooks, inventors' certificates and patents of the Russian Federation.

Information about the author: Post Graduate Student of the G.M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute (JSC "ENIN"), Analyst of JSC "En+ Management".

Education: National Research Irkutsk State Technical University, 2012; Baikal State University of Economics and Law, 2012.

Awards: Acknowledgment of the JSC "Eurosibenergo" 2014; a diploma for victory and leadership qualities of TNK-BP 2014; Laureate of various awards in the field of development of the Fuel and Energy Complex, winner of All-Russian competitions.

Research interests: fuel utilization technologies; fossil fuel combustion processes; ecology of power engineering; aerodynamic schemes of draft machines and heating surfaces of regenerative heaters.

Publications: more than 10 including 1 textbook.



Александр Олегович
Перфильев
Aleksandr Perfiliev





Александр Михайлович
Грибков
Aleksandr Gribkov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета.

Награды: значок «Старейший энергетик Татарии»; «Ветеран труда КФ МЭИ»; «Ветеран труда Республики Татарстан»; «Заслуженный энергетик Республики Татарстан»; медаль «В память 1000-летия Казани»; почетная грамота Министерства образования и науки РФ.

Образование: Московский энергетический институт (1974 г.)

Область научных интересов: оптимизация сжигания органического топлива в котлах ТЭС; контроль выбросов котлами ТЭС, рассеивание выбросов в атмосфере; оптимизация газоздушных трактов котлов; контроль приземных концентраций, контроль теплового состояния топки котла.

Публикации: более 110, включая патенты РФ, учебные и методические пособия.
h-index: 4

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Kazan State Power Engineering University, Professor of the Heat and Power Plant Department.

Awards: a Badge “The Eldest Power Engineering Specialist of Tataria”; Veteran of MPEI labour; Veteran of labour of Republic of Tatarstan; Honored power engineering specialist of Republic of Tatarstan; Medal “In memory of the 1000th anniversary of Kazan”; the honorary diploma of Department of Education and Science of the Russian Federation.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1974.

Research interests: optimization of fossil fuel combustion in the boilers of thermal power plants; emission control, dispersion of emissions in the atmosphere; optimization of gas-airflow ducts of boilers; control of the ground concentrations; control of the thermal state of boiler furnace.

Publications: more than 110 including patents of the Russian Federation, textbooks, tutorials.



Вячеслав Яковлевич
Путилов
Viacheslav Putilov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, ведущий научно-образовательным центром «Экология энергетики» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» (НОЦ «Экология энергетики» МЭИ); академик РАПЭ; член секции «Энергосберегающие и экологические проблемы энергетики» Научно-технического совета Единой энергетической системы России (с 1987 г.).

Награды: дипломы ВДНХ/ВВЦ бронзовая медаль ВДНХ СССР в 1987 г.; медаль «В память 850-летия Москвы»; лауреат IV Национальной экологической премии России за 2007 г.; диплом Минобрнауки России в 2007 г.; лауреат Польской награды в области решения проблемы золошлаков энергетики «Phoenix 2009».

Образование: Московский энергетический институт (1972 г.); Московский институт управления (1982 г.).

Область научных интересов: природоохранные технологии в энергетике; проблема обращения с золошлаками тепловых электростанций; повышение квалификации и профессиональная переподготовка специалистов энергопредприятий по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Электроэнергетика и электротехника»; информационное обеспечение природоохранной деятельности энергопредприятий ТЭК, ЖКХ и других отраслей экономики.

Публикации: более 155, включая монографии, авторские свидетельства и патенты РФ, учебники, учебные и практические пособия, отраслевые руководящие документы.

h-index: 4

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Head of the Center for Science and Education “Ecology of Power Engineering” of MPEI; Academician of the Russian Academy of Industrial Ecology (RAIE); Member of the Section “Energy Saving and Ecological Problems of Power Engineering”; Scientific and Technical Council of the Russian Energy System since 1987.

Awards: Diplomas of VDNH, a Bronze Medal of VDNH of USSR in 1987; Medal “In Memory of the 850th Anniversary of Moscow”; Laureate of IV National Ecological Award for 2007; diploma of the Ministry of Education and Science of Russia for 2007; Laureate of the Polish Award on solution of the coal ash handling problem.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1972; Moscow Institute of Management, 1982.

Research interests: nature protection technologies in power engineering; coal ash handling; professional development and retraining of specialists of power utilities in the field of thermal power engineering and electric power engineering; information support of nature protection activity of power utilities of the fuel and energy complex; housing and communal services and other branches of economy.

Publications: more than 155 including monographs, certificates and patents of the Russian Federation, textbooks, tutorials, manuals and branch guidelines.





Дмитрий Вячеславович
Горбуров
Dmitri Gorburov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Тепловые электрические станции» НИУ «МЭИ».

Образование: Московский энергетический институт (1992 г.).

Область научных интересов: котельные установки и парогенераторы; водные режимы ТЭС.

Публикации: более 17, включая учебные пособия.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer of the Thermal Power Plant Department, MPEI.

Education: Moscow Power Engineering Institute, 1992.

Research interests: boilers and steam generators; water regime of thermal power plants.

Publications: more than 17 including tutorials.

Введение

Добыча угля в Российской Федерации ведётся в 7 федеральных округах и 25 субъектах на 192 угольных предприятиях, при этом 71 предприятие являет-

ся угольными шахтами и 121 – разрезами. Совокупная производственная мощность угольных предприятий по добыче угля составила 407,6 млн т (на 01.01.2016.) [1].

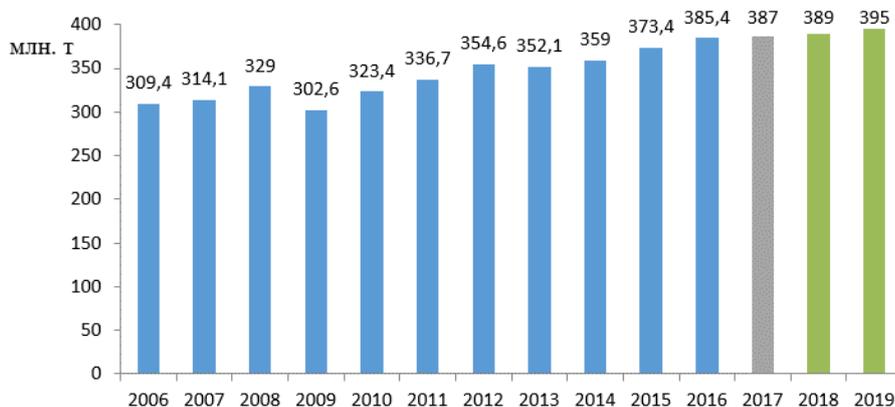


Рис. 1 – Добыча угля в России в 2006–2019 гг., млн т (2017–2019 гг. – прогноз Минэнерго [2])
Fig. 1 – Coal production in Russia in 2006–2019, million tons (2017–2019 – forecast of the Ministry of Energy [2])

Как показано на рис. 1, несмотря на экономический кризис 2008 г. общая тенденция роста угледобычи в России сохраняется, пик добычи приходится на 2016 г. (385,4 млн. т) [1]. Минэнерго России сделало следующий прогноз динамики добычи угля: 2017 г. – 387 млн т; 2018 г. – 389 млн т; 2019 г. – 395 млн т [2].

Согласно Долгосрочной программе развития угольной промышленности России до 2030 г. (далее – «Долгосрочная программа»), годовая добыча угля составит 390 ÷ 430 млн т, и будет осуществляться на 82 разрезах и 64 шахтах при благоприятной конъюнктуре рынка, в противном случае добыча останется на прежнем уровне – 385 млн т. В соответствии с «Долгосрочной программой» планируется увеличить добычу угля в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке за счёт создания новых угледобывающих центров в этих регионах. Доля регионов в общей добыче угля в России возрастет с 35,7 % в 2011 г. до 47 % к 2030 г. [3].

В «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» (ЭС-2030) указывается, что объем добычи угля к 2030 г. составит 430 ÷ 470 млн т, из них

250 млн т – для внутреннего потребления. Доля угля в выработке электроэнергии на тепловых электростанциях должна существенно увеличиться – с 28 % до 36 % [4].

В последние десятилетия в топливно-энергетическом секторе России появились примеры объединения топливобывающих энергетических компаний в корпорации. При определении степени эффективности этого объединения необходима комплексная оценка факторов, влияющих на прибыль:

- обеспечение ТЭС поставками топливом заявленного качества;
- эффективное использование топлива;
- снижение затрат на использование топлива, обеспечение спроса и стабильности цен;
- снижение расхода мазута (газа) на восполнение недостающего тепла, технологические нужды и замещение твердого топлива;
- увеличение объема реализуемой продукции и снижение ее себестоимости;
- возможность минимизации запасов угля на складах тепловых электростанций (ТЭС);

- исключение посреднических организаций, участвующих в поставках угля на склады ТЭС;
- отпуск электроэнергии топливодобывающему предприятию по отпускному тарифу ТЭС, а не по тарифу энергосистемы;
- отказ от поставок дорогих дальнепривозных проектных углей, переход на местные непроектные виды топлива;
- снижение платы за сверхнормативные вредные выбросы в окружающую среду.

Некоторые из этих факторов показывают, что предприятия в погоне за прибылью не уделяют должного внимания или совсем игнорируют экологический аспект.

В отечественной энергетике постепенно увеличивается доля сжигания угля местных месторождений ухудшенного качества ввиду роста цен на природный газ и мазут и тарифа на железнодорожные перевозки. Выработка местных месторождений приводит к дефициту проектных сортов углей, поэтому топливо, добываемое, как правило, на местных угольных разрезах, не соответствует заявленным проектным характеристикам работы котельного оборудования ТЭС. Применение непроектных видов топлива вызывает проблемы при эксплуатации оборудования: к ухудшению работы распыливающих устройств, к пульсациям факела горения, срывам факела, нестационарности температур металла экранов топков котлов, шлакованию и перегреву поверхностей нагрева, взрывам в топках и газоходах и т.д. Это приводит также к недовыработке энергии, снижению среднеэксплуатационного КПД и существенно сказывается на уровне надежности и экологической безопасности эксплуатации котельных установок – преждевременному износу ответственных элементов оборудования и увеличению числа отказов. В результате растут затраты, связанные с увеличением объемов работ на котельных установках в ремонтную кампанию. Эта проблема тесно связана и с частой заменой низко-

температурных поверхностей нагрева (НТПН) при сжигании высокосернистого топлива.

Для того чтобы сохранить экономические показатели и надежность оборудования при использовании непроектных видов топлива, требуются разработка и выполнение комплексных мероприятий в системе подготовки и сжигания топлива.

В Российской Федерации в 2014–2015 гг. был принят ряд важных нормативных правовых актов, содержащих комплекс мер по переходу на принципы наилучших доступных технологий (НДТ), в том числе [5–10].

Согласно нормам и требованиям ФЗ № 219 [5], основные мероприятия для угольных ТЭС должны заключаться в модернизации действующего котельного оборудования, изменении технологии сжигания, повышении энергетической и экологической эффективности работы оборудования. Таким образом, актуальной задачей является поиск технически возможных и экономически целесообразных вариантов с разработкой научно-обоснованных предложений повышения экологичности, надежности и эффективности работы низкотемпературных поверхностей нагрева энергетических котлов для сокращения ремонтного фонда генерирующих компаний и, следовательно, снижения себестоимости производства энергии. На основе ИТС НДТ «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» для объектов электроэнергетики, авторами данной статьи был проведен анализ технологий, методов и способов снижения выбросов оксидов серы (на примере ТЭЦ-10 Иркутской области) с учетом структуры сжигаемого топлива. Помимо этого, был описан процесс образования агрессивных химических элементов при сжигании высокосернистого топлива в топках энергетических котлов и предложены некоторые технические решения для снижения вредных выбросов оксидов серы с дымовыми газами в атмосферный воздух.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Коэффициент избытка воздуха
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Зольность топлива
Q	Теплота сжигания топлива, кДж/кг
S	Содержание серы в топливе, %
t	Температура, °С
W	Влажность топлива, %
<i>Индексы нижние</i>	
ca	Холодный воздух
$cond$	Конденсация
dp	Точка росы
exg	Уходящие газы
f	Унос
l	Низшая
red	Приведённая
<i>Аббревиатуры</i>	
ВЗП	Воздухоподогреватель
ЖКХ	Жилищно-коммунальное хозяйство

Продолжение списка обозначений

ИТС	Информационно-технический справочник
КГЭУ	Казанский государственный энергетический университет
КПД	Коэффициент полезного действия
НДТ	Наилучшая доступная технология
НТПН	Низкотемпературные поверхности нагрева
ПДВ	Предельно допустимые выбросы
ПН	Поверхность нагрева
РАПЭ	Российская академия промышленной экологии
РД	Руководящий документ
ТЭК	Топливо-энергетический комплекс
ТЭС	Тепловая электрическая станция
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ФЗ	Федеральный закон

Теоретический анализ

На рис. 2 представлена диаграмма, характеризующая фактическое состояние удельных выбросов оксидов серы ($\text{мг}/\text{м}^3$) на одной из ТЭЦ Иркутской области (ТЭЦ-10), которая показывает, что только на котлах № 4–7 выполняется норматив по ГОСТ Р 50831-95 (ГОСТ). На сегодняшний день фактические показатели отражают достаточно благоприятное состояние с выбросами оксидов серы, так как в целом они не превышают действующих ПДВ [11].

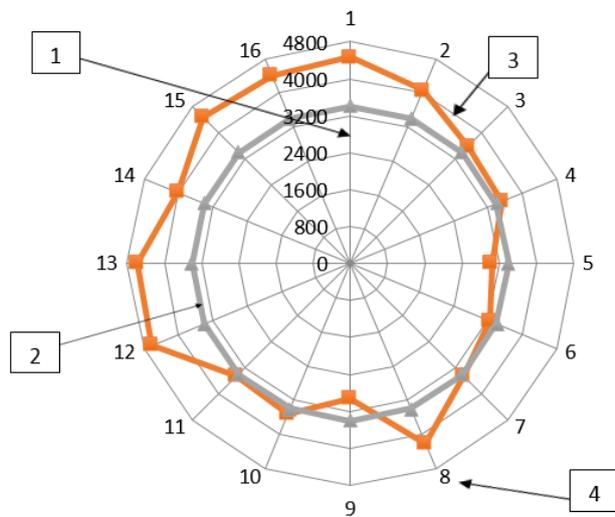


Рис. 2 – Фактические удельные выбросы оксидов серы на одной из ТЭЦ Иркутской области: 1 – шкала удельных выбросов оксида серы, $\text{мг}/\text{м}^3$; 2 – норматив удельных выбросов оксидов серы в атмосферу по ГОСТ Р 50831-95 для котельных установок, введенных на ТЭС до 31.12.2000; 3 – фактические показатели удельных выбросов оксида серы; 4 – порядковый номер котла

Fig. 2 – Actual specific emissions of sulfur oxides at one of the thermal power plants of the Irkutsk region: 1 – scale of specific emissions of sulfur oxide, mg / m^3 ; 2 – the standard of specific emissions into the atmosphere of sulfur oxides in accordance with GOST R 50831-95 for boiler plants introduced at TPPs until 31.12.2000; 3 – actual indicators of specific emissions of sulfur oxide; 4 – the number of the boiler

Наиболее агрессивной примесью в углях Иркутского бассейна является сера. Сжигание угля с высоким содержанием серы приводит к ряду экологических и

технологических проблем: загрязнение атмосферы оксидами серы; снижение КПД котла; серно-кислотная коррозия низкотемпературных хвостовых поверхностей нагрева (экономайзерная поверхность, в редких случаях воздухоподогреватель), газоочистных установок, дымососов, газоходов и дымовых труб [12].

В ряде случаев низкотемпературная коррозия может повреждать и трубы топочных экранов, закрытых футеровкой, при длительных остановках котлов после водных обмывок топки и нарушениях в системах отвода воды (рис. 3).



Рис. 3 – Язвенная коррозия экранных труб
Fig. 3 – Ulcer corrosion of screen tubes

в твердом топливе сера находится в трех формах: пиритная, органическая, сульфатная, при этом содержание сульфатной серы не превышает $0,1 \div 0,2 \%$.

Сера в углях Иркутского бассейна обычно содержится в составе различных минеральных и органических соединений и реже в элементарном виде. Основное количество серы в углях представлено минеральной (пиритной) и органической серой. При сжигании сернистого угля в топочной камере котельного агрегата вся сера (минеральная и органическая) сгорает (окисляется).

Сера влияет на процессы шлакования в топках котлов, коррозии ПН и газоходов котлов, а также на экологические показатели. Около 96 % общего количества серы, содержащейся в угольной пыли, улету-



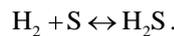
чивается и выносится из топки в виде газообразных продуктов, а остальное удаляется в основном с золой уноса и шлаком.

Строго говоря, низкотемпературную коррозию вызывает совместная конденсация паров воды и серного ангидрида за счет температурной депрессии. Концентрированная серная кислота вообще не реагирует с железом, поскольку на поверхности образуется оксидная пленка, препятствующая протеканию реакции.

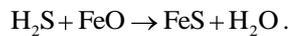
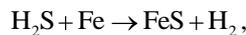
При сгорании топлива с повышенным содержанием серы образуется сернистый ангидрид (SO_2) (до 95 %), и серный ангидрид (SO_3) (до 5 %).

Формирование и изменение коррозионной агрессивности продуктов сгорания сернистого топлива происходят по всему газовому тракту котла как в процессе горения топлива, так и в результате процессов на высокотемпературных поверхностях нагрева [13].

В зоне высоких температур (топка, экраны, ширмы) одним из основных коррозионных агентов является сероводород, который образуется в зоне горения и зависит от конструктивных и режимных факторов. Появление сероводорода в продуктах сгорания сернистого топлива связано с общим и локальным недостатком воздуха в зоне горения:

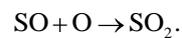
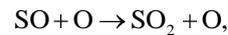
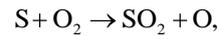


Сероводород реагирует как с металлом, так и с оксидной пленкой:

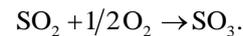
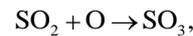
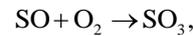


В результате взаимодействия сероводорода с металлом экранных поверхностей нагрева образуются сульфиды железа, которые активно окисляются до окислов железа. На основе опыта эксплуатации отечественных котлов был сделан вывод о том, что коррозия экранных труб наблюдается в топках котлов с температурой внутрикотловой среды выше 300 °С.

Помимо этого, при сжигании серосодержащего топлива образуется два оксида серы: сернистый ангидрид SO_2 и серный ангидрид SO_3 . Сернистый ангидрид образуется преимущественно в результате следующих реакций:



Принято, что образование SO_3 происходит по одной из трех реакций:



Концентрация диоксида серы SO_2 в дымовых газах обычно находится в диапазоне 0,02 ÷ 0,5 % и мало влияет на коррозионные процессы [14]. Однако в процессе горения топлива часть диоксида серы окисляется до соединений высшей валентности SO_3 (рис. 4).

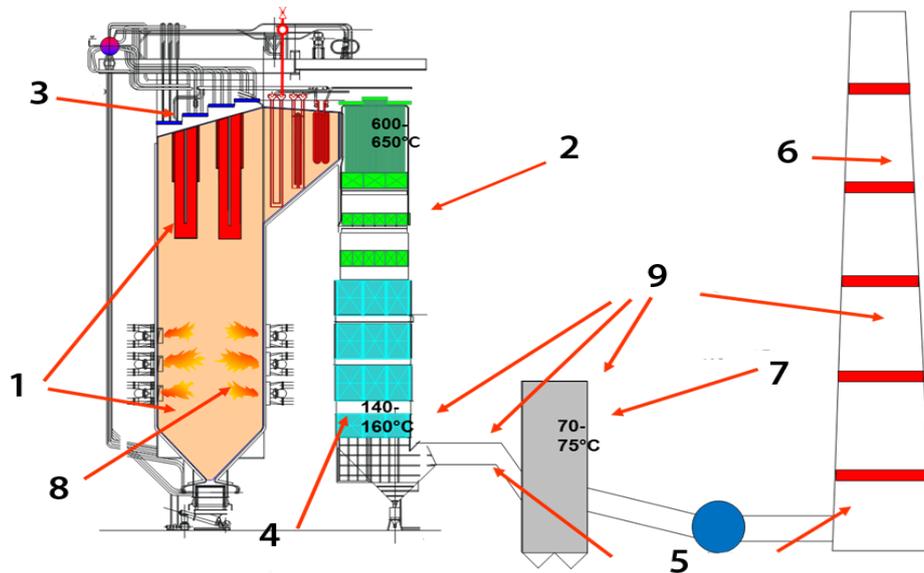
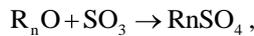


Рис. 4 – Механизм образования серной кислоты в котельном оборудовании и основные места, подверженные влиянию серноокислой коррозии: 1 – экранная система; 2 – водяная экономайзер; 3 – пароперегреватель (проход через обмуровку); 4 – воздухоподогреватель; 5 – газоходы котла; 6 – дымовая труба; 7 – золоуловитель; 8 – образование паров SO_2 и SO_3 при горении топлива; 9 – места конденсации паров серной кислоты $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$

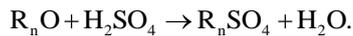
Fig. 4 – Mechanism of sulfuric acid formation in boiler equipment and the main places susceptible to damage by sulfuric acid corrosion: 1 – screen system; 2 – water economizer; 3 – superheater (passage through lining); 4 – air heater; 5 – boiler flues; 6 – chimney; 7 – ash catcher; 8 – SO_2 and SO_3 vapor formation during fuel combustion; 9 – places of condensation of sulfuric acid $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$

Серный ангидрид может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях. В продуктах сгорания энергетического топлива SO_3 бывает в газообразном состоянии и в виде соединений с водой (серной кислоты). Преобразование окислов серы может происходить на высокотемпературных поверхностях нагрева. Реакции идут практически по всему газовому тракту котла. Однако их интенсивность различна и во многом зависит от места расположения поверхностей нагрева, температурного режима, времени контакта продуктов сгорания с поверхностью нагрева, состава золовых отложений, их количества и т.п. Некоторые отложения увеличивают скорость реакций за счет своих каталитических свойств.

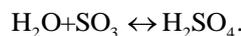
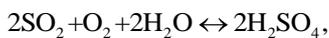
Наличие в золе топлива щелочных компонентов приводит к снижению концентрации серного ангидрида в высокотемпературной зоне по реакции:



где R_nO – окись щелочного металла; а в низкотемпературной зоне – к снижению скорости коррозии по реакции:



Вода и водяные пары попадают в котел с топливом, воздухом и с аппаратов очистки поверхностей нагрева, а также образуются в результате реакций горения топлива. Сернистый ангидрид растворяется в воде. Водный раствор двуокиси серы содержит молекулы SO_2 , H_2O и H_2SO_3 . Раствор сернистой кислоты частично разлагается по реакции:



Реакция взаимодействия паров воды с SO_3 характеризуется большой скоростью протекания. При 300°C в дымовых газах содержатся соизмеримые количества SO_3 и паров H_2SO_4 , ниже 200°C (низкотемпературные поверхности нагрева, воздухоподогреватель, газоходы и дымовая труба) – только пары H_2SO_4 . Образовавшаяся серная кислота здесь частично конденсируется при температуре точки росы (примерно $120 \div 150^\circ\text{C}$). В результате ускоряются коррозионные процессы на поверхностях оборудования.

При сжигании сернистых твердых топлив в пылевидном состоянии температура точки росы дымовых

газов рассчитывается по приведенному содержанию серы и золы в топливе и температуре конденсации водяных паров, по формуле [14]:

$$t_p = t_{cond}^{\text{H}_2\text{O}} + \frac{129 \sqrt[3]{S_{red}^r}}{1,05^{\alpha_f A_{red}^r}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В [15] и [16] приведена фактически аналогичная формула:

$$t_p = t_{cond}^{\text{H}_2\text{O}} + \frac{125 \sqrt[3]{S_{red}^r}}{1,05^{\alpha_f A_{red}^r}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_{cond}^{\text{H}_2\text{O}}$ – температура конденсации водяных паров, $^\circ\text{C}$;

α_f – доля золы топлива в уносе;

S_{red}^r – приведенное содержание серы на рабочую массу топлива, % кг/МДж;

A_{red}^r – приведенное содержание золы на рабочую массу топлива, % кг/МДж.

Приведенное содержание серы на рабочую массу топлива определяется по формулам:

$$S_{red}^r = \frac{10^3 S^p}{Q_p^l},$$

$$A_{red}^r = \frac{10^3 A^p}{Q_p^l},$$

где S^p , A^p – серность и зольность топлива соответственно, %;

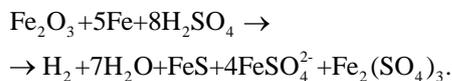
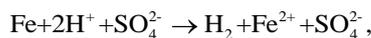
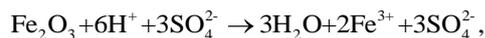
Q_p^l – низшая теплота сгорания топлива, КДж/кг.

При температуре стенки $90 \div 110^\circ\text{C}$ скорость коррозии в водных растворах серной кислоты при $60 \div 80\%$ концентрации достигает 5 мм/год. Такая низкая стойкость углеродистой стали связана с хорошей растворимостью в серной кислоте продуктов коррозии.

Нежелательной является работа котлов на пониженных нагрузках, которая, как правило, приводит к снижению температуры уходящих газов, что в еще большей степени усиливает коррозионные процессы [17].

Процесс низкотемпературной коррозии металлических поверхностей нагрева заключается в растворении окисной пленки металла кислотой (электрохимической коррозии). Одновременно происходит взаимодействие металла с электролитом. Таким образом, имеет место многостадийный процесс, который для поверхности, изготовленной из стали, можно описать следующими уравнениями:





При одних и тех же потоках конденсации кислоты из дымовых газов интенсивность коррозии будет, видимо, определяться свойствами и составом отложений.

Образование сплошного слоя нерастворимых инертных солей отложений могло бы привести к прекращению процесса коррозии, однако при эксплуатации ввиду специфических свойств продуктов коррозии этого не происходит.

Подобное негативное воздействие приводит к разрушению металла, из которого изготовлены элементы котельной установки: появлению сквозных отверстий, увеличению присосов холодного воздуха и еще большему ускорению коррозионных процессов. Повсеместная коррозия низкотемпературных элементов котельной установки, контактирующих с капельной влагой и дымовыми газами, приводит к периодическому ремонту (восстановлению) или полной замене этих элементов. Поэтому особенно важно предотвратить появление первых серьезных очагов сернокислотной коррозии, которые в будущем могут ускорить свой рост в геометрической прогрессии.

Методы защиты от сернокислотной коррозии

Способы защиты от сернокислотной коррозии зависят от температурной области, в которой находятся места повреждений, и степени интенсивности коррозии. Данные условия определяются характером протекания этого процесса.

Методы защиты от сернистой коррозии, которые должны быть выбраны исходя из экономической целесообразности, можно разделить на следующие группы:

I. Борьба на стадии проектирования:

- 1) использование котлов с кипящим слоем;
- 2) внутрицикловая газификация угля;
- 3) очистка уходящих дымовых газов от оксидов серы (решает задачу только снижения выбросов в окружающую среду);

II. Обессеривание угля на стадии, предшествующей процессу сжигания (базируется на технологиях удаления серы из топлива).

Обычно в топку с топливом вводится такое же количество серы, как на месте добычи. Удаление серы из топлива является сложным физико-химическим процессом, проведение которого экономически затруднительно. Однако удаление серы (сернистого колчедана) из топлива может происходить путём механической сепарации в пылеприготовительных устройствах. Возможность гравитационной сепарации колчедана основана на его большем удельном весе по сравнению с углём.

Следует отметить, что обогащение топлива в жидких средах на углеобогащительных фабриках, породотборкой на шахтах и циклонной сепарацией на ТЭС малоэффективно в силу малой удельной поверхности минеральных соединений серы и золообразующих пород. С другой стороны, процесс глубокой деминерализации и десульфурации энергетического твердого топлива целесообразно проводить непосредственно на ТЭС, что может быть обосновано следующими соображениями:

- тонкий помол топлива, практически обеспечивающий раскрытие пиритной серы, является штатной технологической операцией на пылеугольных ТЭС;
- обогащение вне пределов станции сопряжено с трудностями дальнейшего транспорта угольной пыли до котельной установки.

В связи с этим одним из направлений технологии углеприготовления может стать более глубокое, чем при жидкостромном и пневматическом обогащении, раскрытие угольной массы механическим путем с последующим разделением частиц в сильном магнитном поле на органический концентрат и негорючую породу. Авторы данной статьи считают перспективным первичным методом снижения содержания серы Иркутских ТЭЦ высокоградиентную магнитную десульфурацию угля непосредственно в системе пылеприготовления [18], которая позволит снизить расход Мугунского угля на номинальных параметрах работы котла примерно на $30 \div 35$ тыс. т/год, при эксплуатации котла в течение 6 000 ч. При этом объем серосодержания в уходящих газах снизится в $3 \div 3,5$ раза [11].

Предварительные оценки показывают [11], что теплотворная способность Мугунского угля Q_p^I , равная 4 083 ккал/кг, после введения криомагнитной сепарации повысится до 4 461 ккал/кг.

Принципиальная технологическая схема высокоградиентной магнитной десульфурации угля показана на рис. 5.



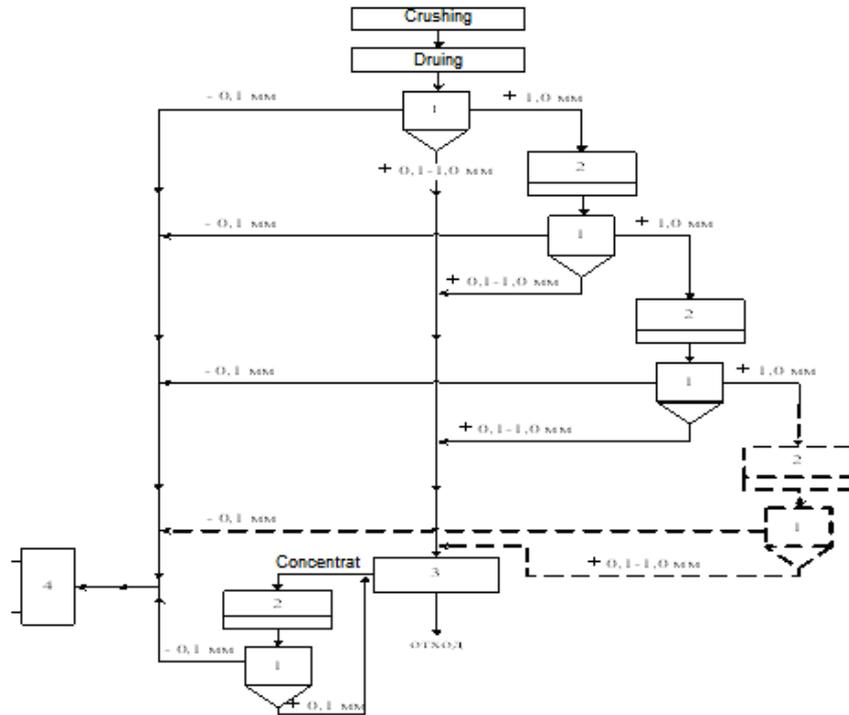


Рис. 5 – Принципиальная технологическая схема высокоградиентной магнитной десульфурации угля: 1 – классификатор; 2 – конусная индукционная дробилка (КИД); 3 – магнитный сепаратор; 4 – котел
Fig. 5 – Principal technological scheme of the high-gradient magnetic desulfurization of coal: 1 – classifier; 2 – cone induction crusher; 3 – magnetic separator; 4 – boiler

III. Методы при эксплуатации котлов:

- 1) подогрев воздуха:
 - а) подогрев в паровых калориферах;
 - б) рециркуляция горячего воздуха;
 - в) комбинированный подогрев.

Прежде чем рассматривать способы предварительного подогрева воздуха, необходимо провести анализ возможности использования воздуха с более высокой температурой, то есть забора воздуха из котельной. На некоторых станциях стремятся в отчетности показать как можно меньшую температуру уходящих газов, поэтому производят забор воздуха с улицы даже тогда, когда по санитарным условиям работы персонала ТЭС возможен забор воздуха из котельной. Однако КПД котла зависит не от температуры уходящих газов, а от разности температуры уходящих газов и воздуха. Единственный способ повысить температуру воздуха перед котлом, который сопровождается повышением КПД за счет снижения потерь тепла в окружающую среду, – использовать более теплый воздух, находящийся в котельной. Например, на котле ТГМ-84Б температура холодного воздуха, забиравшегося с улицы, составляла $t_{ca1} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура уходящих газов $t_{exg1} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$. После переброски шиберов на забор холодного воздуха из помещения котельной эти температуры соответственно изменились на: $t_{ca1} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_{exg1} = 121\text{ }^{\circ}\text{C}$. КПД котла $\Delta\eta$ при этом увеличился на 0,38 % с учетом изменения собственных нужд котла. Учитывая, что забор более теплого воздуха позволяет также

повысить эффективность предварительного подогрева воздуха для уменьшения низкотемпературной коррозии при всех других способах его дальнейшего подогрева, варьирование режимов забора холодного воздуха из котельной становится более привлекательным [19].

- 2) использование присадок (для пылеугольных топок применение присадок не нашло широкого применения);
- 3) удаление оксидов серы из уходящих дымовых газов (вторичная мера, не решающая задачу защиты НТПН);
- 4) переход на сжигание топлива с низким содержанием серы;
- 5) использование коррозионностойких материалов, нанесение покрытий.

Основываясь на опыте промышленной эксплуатации, можно отметить, что рециркуляция воздуха применяется на электростанциях в тех случаях, когда для устранения коррозии достаточно просто предварительно подогреть воздух до $50 \div 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При более интенсивном подогреве температура уходящих газов значительно повышается, что приводит к заметному снижению КПД котла [20].

Для сернистого топлива с высокой температурой точки росы дымовых газов (выше $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) способы борьбы с коррозией, основанные на повышении температуры стенки в наиболее холодной части ВЗП выше точки росы, в том числе рециркуляцией воздуха, часто являются нецелесообразными, так как при-

водят к недопустимо большой потере тепла с уходящими газами.

Результаты и их обсуждение

Анализ технологий, приемлемых для ТЭЦ Иркутской области, показывает, что внедрение вторичных мероприятий десульфуризации дымовых газов для достижения технологических показателей НДТ по оксидам серы экономически нецелесообразно ввиду высокой стоимости сероочисток. Особенно это касается установок сероочистки на котлах небольшой мощности, срок эксплуатации которых превышает 40 лет, поскольку чем выше мощность котла и сернистость топлива, тем ниже стоимость улавливания диоксида серы. Тем более что исходные экологические характеристики котельных установок ряда ТЭЦ Иркутской области находятся на приемлемом уровне.

без внедрения дорогостоящих методов вторичного подавления диоксидов серы. На рис. 6 наглядно показаны результаты предлагаемых решений.

При использовании угля с Ирбейского разреза вместо смеси углей с Азейского, Мугунского, Черемховского и Головинского разрезов концентрация диоксида серы в дымовых газах котлов снижается в 4,23 раза [11], что обеспечивает выполнение нормативов качества атмосферы за границами санитарной защитной зоны. Снижение концентрации диоксида серы в уходящих газах котлов до 1 090 мг/нм³ позволит выполнить нормативы технологических показателей удельных выбросов для данной категории установок, с учетом срока ввода в работу, без внедрения вторичных мер сероочистки.

Заключение

Наиболее агрессивной примесью, присутствующей в углях Иркутского бассейна, является сера. Сжигание угля с высоким содержанием серы приводит к ряду экологических и технологических проблем: загрязнению атмосферы оксидами серы; снижению КПД котла; сернокислотной коррозии низкотемпературных хвостовых поверхностей нагрева (экономайзерная поверхность, в редких случаях воздухоподогреватель), газоочистных установок, дымососов, газоходов и дымовых труб. Рациональным решением для ТЭЦ Иркутской области, использующих уголь Иркутского бассейна с высоким содержанием серы, будет предварительный глубокий подогрев воздуха.

Нежелательной является работа котлов на пониженных нагрузках, которая приводит к снижению температуры уходящих газов, что в еще большей степени усугубляет коррозионные процессы. На отдельных котлах это не всегда можно осуществить без их реконструкции, поэтому предпочтительно замещение высокосернистого угля углём с наименьшим содержанием серы.

Следует учитывать тот факт, что подогрев воздуха не избавляет от повышенных выбросов серы, поэтому ввиду ожидаемых изменений в законодательстве этот способ может быть лишь временным решением по поддержанию низкотемпературных поверхностей нагрева в рабочем состоянии.

Одним из путей снижения коррозии НТПВ и выбросов загрязняющих веществ является улучшение характеристик угля путём снижения содержания в нём серы и тяжёлых металлов.

Уголь является диамагнитным веществом. Удельная магнитная восприимчивость диамагнитных тел отрицательная. Минеральные примеси в углях характеризуются парамагнитными свойствами. Различия в магнитных свойствах угольного вещества и минеральных примесей позволяют применять магнитный метод для обогащения угля путём магнитной или электромагнитной сепарации, определяемой в информационном техническом справочнике по наи-

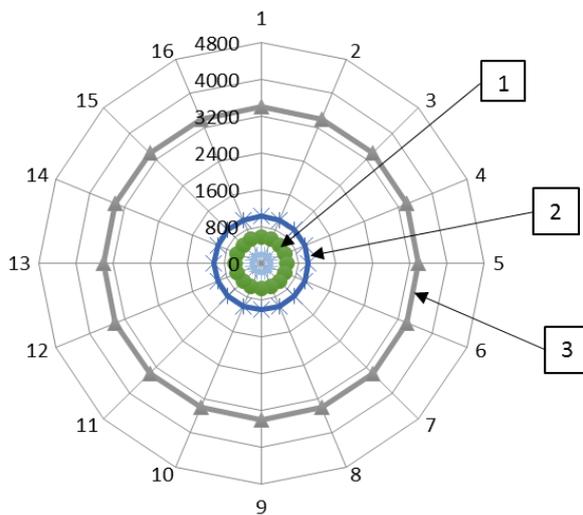


Рис. 6 – Удельные выбросы оксидов серы на ТЭЦ-10 Иркутской области после внедрения предлагаемых решений: 1 – концентрация оксидов серы при переходе на Ирбейский уголь; 2 – концентрация оксидов серы при внедрении десульфации Мугунского угля (при степени очистки угля порядка 60 %; 3 – норматив удельных выбросов в атмосферу оксидов серы по ГОСТ Р 50831-95 для котельных установок, введённых на ТЭС до 31.12.2000.

Fig. 6 – Specific emissions of sulfur oxides at the thermal power plants (TPP-10) of the Irkutsk region after the introduction of the proposed solutions: 1 – concentration of sulfur oxides in the transition to Irbeisk coal; 2 – concentration of sulfur oxides during the introduction of Mugun coal desulphurization (with a degree of coal cleaning of the order of 60%); 3 – specific emission of sulfur oxides in accordance with GOST R 50831-95 for boiler plants introduced at the TPP until 31.12.2000

Альтернативой установке сероочистки для снижения выбросов диоксида серы в уходящих газах может быть перевод котлов на сжигание малосернистых углей [11], которые входят в перечень НДТ по снижению выбросов загрязняющих веществ и экономически выгодны. Это связано с увеличением нагрузки котлов



лучшим доступным технологиям ИТС 37-2017 «Добыча и обогащение угля» как перспективная технология НДТ. Достоинством данного метода наряду со снижением серы является, например, возможность практически 100%-ного извлечения ртути на стадии обогащения угля.

В связи с этим актуальными являются методы десульфурации и десульфуризации или их сочетание. Решение об обогащении угля или строительстве установок сероочистки необходимо принимать в каждом конкретном случае.

Работа по определению технически возможных и экономически целесообразных вариантов экологической эффективности работы ТЭЦ с учетом ИТС 38-2017 для объектов электроэнергетики «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» должна являться одной из приоритетных не только для Иркутской области, но и для угольной генерации в целом.

Список литературы

[1] Добыча угля / основные показатели. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/435> (дата обращения: 23.07.2017).

[2] Минэнерго прогнозирует рост добычи угля в России до 387 млн тонн в 2017 году // газета Ведомости. 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/news/2017/03/17/681685-minenergo-uglya> (дата обращения: 23.07.2017).

[3] Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации №1099-р от 21 июня 2014 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/> (дата обращения: 27.07.2017).

[4] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. №1715-р, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/> (дата обращения: 29.07.2017).

[5] Федеральный закон от 21 июля 2014 г. № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/> (дата обращения: 20.07.2017).

[6] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2014 г.; № 2674-р «Об утверждении перечня областей применения наилучших доступных технологий».

[7] Постановление Правительства РФ от 23.12.2014 № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования

информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям».

[8] Постановление Правительства РФ от 28.09.2015 № 1029 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».

[9] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2014 г. № 398-р «Об утверждении комплекса мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий».

[10] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 03 июля 2014 г. № 1217-р «Об утверждении плана мероприятий («дорожная карта») «Внедрение инновационных технологий и современных материалов в отраслях топливно-энергетического комплекса» на период до 2018 года».

[11] Отчет о научно-исследовательской работе: «Разработка оптимальных вариантов модернизации или строительства оборудования ТЭЦ -10 ПАО «ИРКУТСКЭНЕРГО» для достижения минимально возможных концентраций вредных выбросов с дымовыми газами в атмосферный воздух». / ОАО «ЭНИН». Инв. № 3/2016. Москва. 2016.

[12] Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы [Текст] / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – Издательство НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003.

[13] Янко, П.И. Шлакование поверхностей нагрева при сжигании непроектных топлив [Текст] / П.И. Янко // Электрические станции. – 1993. – № 3. – С. 29–31.

[14] Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник [Текст] / В.В. Абрамов и др.; под общей ред. В.Я. Путилова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 388 с.

[15] Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) [Текст] // Под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: «Эколит», 2011. – 296 с.

[16] РД 34.26.105 (МУ 34-70-118-84) Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котлов, 2005 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://snipov.net/database/c_4294966485_doc_4294817628.html/ (дата обращения: 12.06.2017).

[17] Пилов, П.И. Оценка магнитной десульфурации каменных углей [Текст] / П.И. Пилов, Ю.С. Мостыка, В.Ю. Шутов // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – Днепропетровск: НПК «Триакон». – 2013. – Вып. 0(ТРТ). – С. 125–136.

[18] Отчет о научно-исследовательской работе: «Разработка технологии обогащения и облагораживания низкосортных твердых топлив с помощью сверхпроводящих сепараторов в системах топливоподготовки ТЭС. Экспериментальная оценка возможности десульфурации и деминерализации подмосковных и донецких (АШ) углей магнитными ме-



тодами» / ОАО «ЭНИН». Гос. регистрация № 01870005003, Инв. № 8.90 009176 Москва. 1988.

[19] Галицкий, Ю.Я. К выбору способа забора холодного воздуха на котлах ТЭС [Текст] / Ю.Я. Галицкий, А.М. Грибков, Д.С. Тюклин // IX Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». Сборник трудов, Казань, 2008 г. – С. 131–135.

[20] Батухтин, А.Г. Оптимизация предварительного подогрева холодного воздуха перед воздухоподогревателями котлов (на примере Харанорской ГРЭС) [Текст] / А.Г. Батухтин, П.Г. Сафронов., М.В. Кириллов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2012. – Вып. 1(142). – С. 97–102.

References

[1] Coal production / main indicators (Dobycha uglya / osnovnye pokazateli). Official website of the Ministry of Energy of the Russian Federation. 2016. Available on: <https://minenergo.gov.ru/node/435> (23.July.2017) (in Russ.).

[2] The Ministry of Energy forecasts the growth of coal production in Russia to 387 million tons in 2017 (Minenergo prognoziruuet rost dobychi uglya v Rossii do 387 mln tonn v 2017 godu). *Vedomosti newspaper*, 2017. Available on: <https://www.vedomosti.ru/business/news/2017/03/17/681685-minenergo-uglya> (date of circulation: 23 July, 2017) (in Russ.).

[3] Long-term program for the development of the Russian coal industry for the period up to 2030. Approved by the decree of the Government of the Russian Federation No. 1099-r of June 21, 2014 (Dolgosrochnaya programma razvitiya ugol'noi promyshlennosti Rossii na period do 2030 g. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii №1099-r ot 21 iyunya 2014 g) (in Russ.).

[4] Energy strategy of Russia for the period until 2030. Approved by the decree of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009 No. 1715-r, 2009 (Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva). Available on: <http://government.ru> (29 July, 2017) (in Russ.).

[5] Federal Law of July 21, 2014 No. 219-FZ “On Amendments to the Federal Law “On Environmental Protection” and certain legislative acts of the Russian Federation” (Federal'nyi zakon ot 21 iyulya 2014. № 219-FZ «O vnesenii izmenenii v Federal'nyi zakon “Ob okhrane okruzhayushchei sredy” i otdel'nye

zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii»). Available on: <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[6] Order of the Government of the Russian Federation of December 24, 2014; No. 2674-r “On approval of the list of areas of application of the best available technologies” (Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 24 dekabrya 2014; № 2674-r «Ob utverzhdenii perechnya oblastei primeniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii») <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[7] Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2014 No. 1458 “On the procedure for determining technology as the best available technology, as well as developing, updating and publishing information and technical guides on the best available technologies” (Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 23.12.2014 № 1458 «O poryadke opredeleniya tekhnologii v kachestve nailuchshei dostupnoi tekhnologii, a takzhe razrabotki, aktualizatsii i opublikovaniya informatsionno-tekhnicheskikh spravochnikov po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam»). Available on: <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[8] Decree of the Government of the Russian Federation No. 1029 of September 28, 2015 “On approval of criteria for assigning objects that have a negative impact on the environment, to objects of I, II, III and IV categories” (Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28.09.2015 № 1029 «Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya ob'ektov, okazyvayushchikh negativnoe vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu, k ob'ektam I, II, III i IV kategorii»). Available on: <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[9] Order of the Government of the Russian Federation of March 19, 2014 No. 398-r “On the approval of a set of measures aimed at refusing to use outdated and inefficient technologies, moving to the principles of the best available technologies and the introduction of modern technologies” (Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 19 marta 2014 g. № 398-r “Ob utverzhdenii kompleksa mer, napravlennykh na otkaz ot ispol'zovaniya ustarevshikh i neeffektivnykh tekhnologii, perekhod na printsipy nailuchshikh dostupnykh tekhnologii i vnedrenie sovremennykh tekhnologii”). Available on: <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[10] Decree of the Government of the Russian Federation of July 3, 2014 No. 1217-r “On the approval of the action plan (road map) Introduction of innovative technologies and modern materials in the fuel and energy sector for the period until 2018” (Rasporyazhenie



Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 03 iyulya 2014. № 1217-r «Ob utverzhdenii plana meropriyatii («dorozhnaya karta») «Vnedrenie innovatsionnykh tekhnologii i sovremennykh materialov v otraslyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa» na period do 2018 goda»). Available on: <http://government.ru> (20 July, 2017) (in Russ.).

[11] Report on research work: "Development of optimal options for modernization or construction of equipment of CHP-10 of PJSC" IRKUTSKENERGO "in order to achieve the minimum possible concentrations of harmful emissions with flue gases in the atmospheric air" (Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote: «Razrabotka optimal'nykh variantov modernizatsii ili stroitel'stva oborudovaniya TETs-10 PAO «IRKUTSKENERGO» dlya dostizheniya minimal'no vozmozhnykh kontsentratsii vrednykh vybrosov s dymovymi gazami v atmosferyni vozdukh») / JSC "ENIN". Moscow. 2016 (in Russ.).

[12] Lipov Yu.M., Tretyakov Yu.M. Boiler installations and steam generators. (Kotel'nye ustanovki i parogeneratory) "Regular and Chaotic Dynamics" Publishing House, 2003 (in Russ.).

[13] Janko P.I. Slagging of heating surfaces during incineration of non-projected fuels (Shlakovanie poverkhnostei nagreva pri szhiganii neproektnykh topliv). *Electric stations*, 1993;3:29–31 (in Russ.).

[14] Abramov V.V., Putilova V.Ya. Modern environmental technologies in the electric power industry: Information book (Sovremennye prirodookhrannye tekhnologii v elektroenergetike: Informatsionnyi sbornik) / Moscow: Publishing house, MPEI, 2007 (in Russ.).

[15] Kuznetsova N.V., Thermal calculation of boiler units (Normative method) (Teplovoi raschet kotel'nykh agregatov (Normativnyi metod)). Moscow: "Ecolit" Publ., 2011, 296 p. (in Russ.).

[16] GD 34.26.105 (MI 34-70-118-84) Methodological instructions for preventing low-temperature corrosion of boilers heating surfaces and gas ducts (RD 34.26.105 (MU 34-70-118-84) Metodicheskie ukazaniya po preduprezhdeniyu nizkotemperaturnoi korrozii

poverkhnostei nagreva i gazokhodov kotlov), 2005. Available on: http://snipov.net/database/c_4294966485_doc_4294817628.html (12 June, 2017) (in Russ.).

[17] Pilov P.I., Mostyka Yu.S., Shutov V.Yu.. Evaluation of magnetic desulphurization of hard coal (Otsenka magnitnoi desul'furatsii kamennykh uglei) / Modern science: research, ideas, results, technology. Dnepropetrovsk: NPVK "Triacon" Publ., 2013;(TTPT), pp. 125–136 (in Russ.).

[18] Report on research work: "Development of technology for the enrichment and upgrading of low-grade solid fuels with the help of superconducting separators in fuel-processing systems of thermal power plants. Experimental evaluation of the possibility of desulphurisation and demineralization of suburban and Donetsk (AH) coals by magnetic methods " (Otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote: «Razrabotka tekhnologii obogashcheniya i oblagorazhivaniya nizkosortnykh tverdykh topliv s pomoshch'yu sverkhprovodyashchikh separatorov v sistemakh toplivopodgotovki TES. Eksperimental'naya otsenka vozmozhnosti desul'furatsii i demineralizatsii podmoskovnykh i donetskikh (ASh) uglei magnitnymi metodami») / JSC "ENIN". State Registration No. 01870005003, Inv. № 8.90 009176 Moscow. 1988 (in Russ.).

[19] Galitsky J.Ya., Gribkov A.M., Tyuklin D.S. To the choice of the method of intake of cold air on the boilers of TPP (K vyboru sposoba zabora kholodnogo vozdukh na kotlakh TES). IX International Symposium "Energy Resource Efficiency and Energy Saving". Collection of Proceedings, 2008, Kazan, p. 131–135 (in Russ.).

[20] Batukhtin A.G., Safronov P.G., Kirillov M.V. Optimization of preheating of cold air in front of air heaters of boilers (for example Kharanorskaya GRES) (Optimizatsiya predvaritel'nogo podogreva kholodnogo vozdukh pered vozdukhopodogrevatelyami kotlov (na primere Kharanorskoii GRES))/ Scientific and technical statements SPbPU. *Natural and Engineering Sciences*, 2012;1(142):97–102 (in Russ.).

Транслитерация по BSI