

УДК 621.928.9

К ВОПРОСУ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООЧИСТКИ И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РФ

*Горбатюк С.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг
технологического оборудования» (sgor02@mail.ru)*

*Макаров П.С., аспирант кафедры «Инжиниринг технологического
оборудования» (pavel13-rus@ya.ru)*

*Сухорукова М.А., инженер Горного института
НИТУ «МИСиС» (marinasuhruk242822@yandex.ru)*

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)**

Аннотация. Проблема снижения выбросов диоксида серы с дымовыми газами угольных тепловых электростанций (ТЭС) является для отечественной энергетики весьма актуальной в связи с ежегодным ростом объемов добычи угля. В настоящей работе проведен анализ статистических данных в области добычи угля, описано текущее состояние в области газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ. Для регулирования выбросов загрязняющих веществ стационарными источниками в России ввели систему предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ). Страна принимает участие в международных программах, направленных на защиту окружающей среды от вредного воздействия человеческой деятельности. Несмотря на общую динамику снижения уровня загрязнения воздуха на территории РФ, выбросы предприятий горно-металлургической отрасли лишь увеличиваются. Это связано с недостатками технического состояния и эксплуатации пылегазоочистного оборудования на предприятиях электроэнергетики. Основными из них являются моральный и физический износ парка оборудования, необходимость реконструкции и модернизации устройств. Средняя степень очистки дымовых газов от золы на российских ТЭС составляет 95,5 %, что заметно меньше, чем за рубежом. Эффективность используемых газоочистных установок не соответствует современным экологическим требованиям. Дымовые газы на ТЭС от оксидов серы и азота не очищаются, практически отсутствуют приборы непрерывного контроля над выбросами ТЭС. В работе приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки. Использование системы кондиционирования газов позволяет на 30 – 40 % сократить объем средств, затрачиваемых на сооружение электростатических фильтров. В последние годы в связи с появлением новых технологий сжигания угля создаются фильтры для очистки горячих газов, изготовленные из керамических материалов. Проведен анализ состояния газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ. Изучена степень воздействия предприятий горно-металлургической отрасли на атмосферу. Осуществлена оценка текущего состояния газоочистного оборудования на предприятиях. Приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

Ключевые слова: газоочистка, золоулавливание, экологическая эффективность, предельно допустимая концентрация (ПДК), предельно допустимый выброс (ПДВ), индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), электростатические фильтры, рукавные фильтры, мокрое пылеулавливание.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-451-457

ВВЕДЕНИЕ

Многие технологические процессы в горно-металлургической отрасли [1 – 15], а также складирование, хранение органического топлива, его подготовка и сжигание в котельных и на тепловых электростанциях (ТЭС) сопровождаются выбросами в воздушную среду вредных веществ, в составе которых, наряду с газовыми соединениями, содержится пыль [16 – 22].

Пыль негативно влияет на здоровье человека. Существуют три пути ее проникновения в наш организм: через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожу. Твердые зольные частицы содержат в своем составе соединения тяжелых металлов и конденсированные ароматические органические системы. Указанные элементы обладают канцерогенными свойствами. Они

замедляют рост и вызывают гибель растений, приводят к увеличению числа заболеваний органов дыхания у людей и животных.

Масштабы загрязнения окружающей среды выбросами золы твердого топлива значительны. В отличие от газовых компонентов, которые в процессе диффузии распространяются как на нижние, так и на верхние слои атмосферы, вследствие чего их концентрация в приземном слое значительно снижается, зольные частицы в основном оседают на землю. Выбросы предприятий энергетической отрасли с каждым годом лишь увеличиваются, вследствие чего необходимо обратить внимание на состояние пылегазоочистных сооружений предприятий электроэнергетики. Эта проблема актуальна как для нашей страны, так и за рубежом [23 – 41].

АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЕ ГАЗООЧИСТКИ И ЗОЛОУЛАВЛИВАНИЯ

На территории РФ можно выделить несколько крупных месторождений энергетического угля, таких как Кузнецкий, Экибастузский, Канско-Ачинский и Интинский (Воркутинский) бассейны, а также ряд местных месторождений. В России угольные тепловые электростанции по состоянию на 2005 г. потребляли около 30 % всего сожженного условного топлива. С намеченной сменой курса топливного баланса в энергетической отрасли, согласно Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 г. (КДР) и подготовленной по заказу российского правительства в 2011 г. стратегии развития до 2020 г. (даже по умеренному сценарию), было предусмотрено увеличение добычи угля до 375 млн т в 2020 г. [42 – 44]. Фактически, по данным Министерства энергетики РФ, в 2019 г. добыча угля достигла 440,65 млн т, что привело к увеличению выбросов диоксида серы. По данным экспертов [45], в 2018 г. в этом антирейтинге на первом месте Индия с годовым объемом выброса в 4586 килотонн. Далее идет Россия – 3683 килотонны, что совпадает с данными Минприроды РФ. Поэтому проблема снижения выбросов диоксида серы с дымовыми газами угольных ТЭС является для отечественной энергетики весьма актуальной.

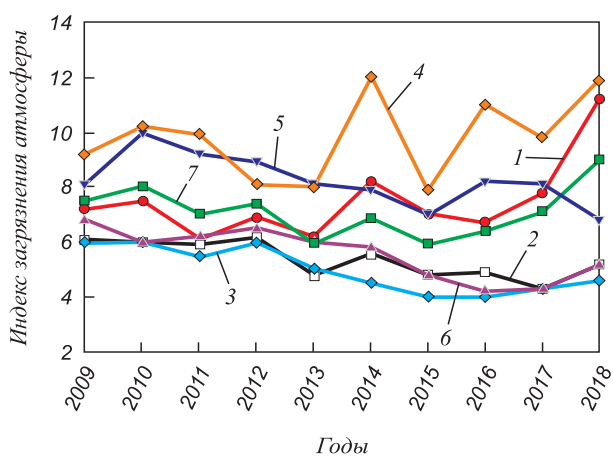
Лучше всего масштабы выбросов на ТЭС отражает ее материальный баланс. Для составления баланса задается мощность ТЭС, равная 2400 МВт, а в качестве сырья используют донецкий антрацитовый штыб. Для

данной ТЭС при сжигании 1060 т угля за час, из топок котлов извлекается 34,5 т шлака, а из бункеров газоочистных установок эффективностью 99 % удаляется 193,5 т золы. Данные отходы сливаются в золоотвалы станций, которые в свою очередь занимают огромные территории и делают непригодным дальнейшее их использование. Однако за час выбрасывается 8 млн. м³ дымовых газов, вместе с которыми также уносятся 2350 т углекислого газа, 251 т водяных паров, 34 т сернистого ангидрида, 9,3 т оксидов азота, 2 т летучей золы при эффективности золоуловителей 99 %.

В начале 1970-х годов Россия начала принимать активное участие в различных международных программах, направленных на защиту окружающей среды от вредного воздействия человеческой деятельности. Например, с 1977 г. страна вошла в состав совместной программы по наблюдению и оценке распространения загрязняющих воздух веществ на большие расстояния в Европе. Европейской комиссией определены исходные требования к экологически чистой ТЭС ($a = 1,4$ в нормальных условиях)*:

Золы не более, г/м ³	0,05
Оксидов серы, г/м ³	0,2 – 0,3
Оксидов азота, г/м ³	0,15 – 0,20
Неочищенных жидких стоков, %	0
Доля твердых отходов, используемых в народном хозяйстве, %	80

* a – показатель избытка кислорода



Изменения индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) за 10 лет в группах городов с крупными предприятиями различных отраслей промышленности:

- 1 – энергетика; 2 – цветная металлургия; 3 – нефтехимическая;
- 4 – алюминиевая; 5 – черная металлургия; 6 – нефтеперерабатывающая; 7 – химическая

Changes in the atmospheric pollution index (IZA) over 10 years in city groups with large enterprises of various industries:

- 1 – energetics; 2 – non-ferrous metallurgy; 3 – petrochemical;
- 4 – aluminum; 5 – ferrous metallurgy; 6 – oil refining;
- 7 – chemical

Для регулирования выбросов загрязняющих веществ стационарными источниками в России ввели систему предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ) (ГОСТ 17.2.02-78), контролируемую местными природоохранными органами. Если количество выбросов ниже ПДВ, то загрязнение воздуха сверх предельно допустимых концентраций (ПДК) отсутствует. При превышении ПДВ до установленного уровня ВСВ, предприятию позволяют выбросы, загрязняющие атмосферу сверх ПДК. Также в каждом регионе установлены свои определенные размеры штрафов для предприятий при выбросах в интервалах от 0 до ПДВ и от 0 до ВСВ. На сегодняшний день нормативными правовыми актами не регламентирован порядок установления нормативов ПДВ [46].

Однако нормативы ПДВ и ПДК и штрафы за их нарушение для стран с высокоразвитой промышленностью все еще значительно строже, чем на территории РФ. Отсюда следует нежелание предприятий обратить внимание на экологическую ситуацию на своей территории, так как платить штрафы дешевле, чем обновить пылегазоочистное оборудование, что несет за собой последствия для экологической обстановки на территории РФ.

В 2009 – 2018 гг. [47] (см. рисунок), уровень загрязнения воздуха в городах с предприятиями горно-метал-

лургической отрасли повысился более чем на 17 %, а за последние пять лет и вовсе на 33 – 34 %.

Несмотря на общую динамику снижения уровня загрязнения воздуха на территории РФ, выбросы предприятий горно-металлургической отрасли лишь увеличиваются. Ввиду вышеизложенного, необходимо обратить пристальное внимание на состояние пылегазоочистных сооружений предприятий электроэнергетики.

Основные показатели и недостатки технического состояния и эксплуатации пылегазоочистного оборудования на предприятиях:

- моральный и физический износ парка оборудования – более 80 %;
- необходимость реконструкции и модернизации пылегазоочистного оборудования для достижения степени снижения выбросов зольных частиц (электрофильтров – 99,8 %, рукавных фильтров – 99,9 %) и обеспечения очистки выбросов ТЭС от летучих соединений, в том числе от оксидов серы (сероочистка, т. е. десульфуризация дымовых газов), оксидов азота (азотоочистка, т. е. денитрификация газов);
- низкий уровень автоматизации и технологического контроля как пылегазоочистных установок, так и основного технологического оборудования;
- отсутствие технологических регламентов работы установок или их несоблюдение;
- недостаточный уровень подготовки эксплуатационного персонала;
- несоблюдение условий эксплуатации пылегазоочистного оборудования;
- несвоевременное и некачественное проведение ремонтных работ не специализированными организациями;
- отсутствие специализированных сервисных служб.

Очистку дымовых газов от твердых зольных частиц проводят на ТЭС с 30-х годов прошлого века. Сегодня системы золоулавливания являются обязательным оборудованием пылеугольных и мазутных котельных установок. Для очистки дымовых газов от

твердых зольных частиц используются электростатические фильтры, рукавные фильтры тканевые, «мокрые» золоуловители на основе скрубберов Вентури. Наиболее глубокой степени очистки удается достичь при комбинировании электростатического фильтра с рукавным фильтром или с кольцевым эмульгатором (см. таблицу).

До настоящего времени в составе газоочистных установок угольных ТЭЦ и котельных РФ широко используются аппараты инерционной очистки и мокрого пылеулавливания – циклоны и аппараты мокрого пылеулавливания, среди которых наиболее эффективными являются турбулентные аппараты (скрубберы) Вентури. Они обеспечивают эффективность улавливания дисперсных частиц золы до 94 – 96 %. Такая эффективность не соответствует современным экологическим требованиям. При этом дальнейшее увеличение эффективности пылеуловителей такого типа за счет изменения конструкции и режимов движения газодисперсной и жидкой фаз не приносит желаемых результатов.

По данным Большой энциклопедии нефти и газа в настоящее время средняя степень очистки дымовых газов от золы на российских ТЭС составляет 95,5 %, что заметно меньше, чем за рубежом [48]. Дымовые газы на наших ТЭС не очищаются от оксидов серы и азота, практически отсутствуют приборы непрерывного контроля над выбросами ТЭС.

Для повышения эффективности работы электростатического фильтра прибегают к кондиционированию дымовых газов (их обработке перед фильтром). Для снижения электрического сопротивления золы в дымовые газы либо добавляют небольшие количества SO₂, сульфата аммония, аммиака, либо в дымовых газах конвертируют SO₂ и SO₃ (с использованием катализатора или под действием импульсного коронного разряда) [49].

По состоянию на 2017 г. в мире эксплуатировалось более 40 котельных установок общей мощностью 66 800 МВт, оборудованных системами кондициони-

Современные методы золоулавливания на тепловых электростанциях

Modern methods of ash collection in thermal power plants

Метод золоулавливания	Степень снижения выбросов зольных частиц, %	Концентрация летучей золы в дымовых газах, мг/м ³
Стандарт России	98,6 – 99,8	50 – 150
Стандарт США (на 2015 г.)	99,9	4 – 5
Электростатические фильтры	98,6 – 99,8	25 – 50
Рукавные тканевые фильтры	99,98	5 – 10
Скрубберы Вентури с интенсивным орошением	99,0 – 99,5	до 25
Кольцевые эмульгаторы	99,5 – 99,8	до 10
Электростатический фильтр + рукавный фильтр	99,9	4 – 5
Электростатический фильтр + кольцевой эмульгатор	99,9	4 – 5

рования. Использование системы кондиционирования газов позволяет на 30 – 40 % сократить объем средств, затрачиваемых на сооружение электростатических фильтров.

В последние годы в связи с появлением новых технологий сжигания угля (в циркулирующем кипящем слое – ЦКС) создаются фильтры для очистки горячих газов. Эти новые фильтры изготавливают из керамических материалов, выдерживающих агрессивные среды и высокие температуры (выше 900 °С). Такие фильтры (из пенной керамики с добавками соединений кремния) способны автоматически очищаться в процессе эксплуатации, так как задержанные сажевые частицы сгорают на поверхности фильтра. Разработаны керамические фильтры двух модификаций:

– первая представляет собой систему «обращенных» свечей, где фильтрация осуществляется на внутренней поверхности тонкостенных трубчатых керамических элементов, заключенных в металлический кожух;

– вторая – с применением плоских керамических пластин.

Керамические фильтры устанавливаются либо непосредственно на выходе горячих газов из котла с ЦКС (в газоходе под давлением), либо после циклона при включении байпасом к циклонной системе. Основными разработчиками керамических фильтров являются фирмы Германии и Японии.

Выводы

В данной работе определена степень воздействия предприятий горно-металлургической отрасли на атмосферу, проведена оценка текущего состояния газоочистного оборудования на предприятиях и приведено обоснование перехода предприятий на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

Несмотря на то, что выбросы предприятий горно-металлургической отрасли вносят огромный вклад в ухудшение экологической обстановки на территории РФ, многие предприятия находят экономически нецелесообразным замену существующих газоочистных установок на новые. В высокоразвитых промышленных странах (США, Япония, Германия и т. д.) [50], в отличие от РФ, все вновь строящиеся предприятия оснащаются установками сероочистки еще до ввода в эксплуатацию. Также ведутся постоянные работы по модернизации существующих методов и аппаратов газоочистки.

В РФ проводят лишь первичные мероприятия по снижению вредных выбросов, которые не способны дать прорывного эффекта в области газоочистки, поэтому необходимо обратить пристальное внимание на состояние газоочистного оборудования на промышленных агрегатах и принять меры, стимулирующие руководство предприятий к переходу на наилучшие доступные технологии в области газоочистки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. No. 2. P. 52 – 60.
2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O. etc. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. No. 4. P. 92 – 99.
3. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Формирование цветной маркировки поверхности металла с помощью высококонцентрированного источника энергии // Металлург. 2016. № 6. С. 91 – 94.
4. Глухов Л.М., Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Эффективные лазерные технологии производства металлопродукции и инструмента // Металлург. 2016. № 3. С. 306 – 312.
5. Naumova M.G., Basyrov I.I., Aliev Kh.B. Reengineering of the ore preparation production process in the context of «Almalyk MMC» JSC // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. Article 01030.
6. Наумова М.Г., Морозова И.Г., Зарапин А.Ю., Борисов П.В. Создание маркировки медного сплава по изменению топологии его поверхности под воздействием лазерной термической обработки // Металлург. 2018. № 5. С. 464 – 469.
7. Kryukov I. Y., Gorbatiyuk S.M., Naumova M. Mathematical model of the crystallizing blank's thermal state at the horizontal continuous casting machine // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. Article 02010.
8. Busygin A.M. The force analysis of the caterpillar excavator stick arrangement mechanism with three degrees of freedom // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2018. No. 1. P. 133 – 142.
9. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 5. С. 410 – 415.
10. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking // Materials Today: Proceedings 2019. Vol. 19. P. 2405 – 2408.
11. Efremov D.B., Gerasimova A.A., Gorbatiyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices // CIS Iron and Steel Review. 2019. Vol. 18. P. 30 – 34.
12. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Study of metal surface with color image obtained with laser marking // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 943 – 948.
13. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorinin N. Simulation of forming a flat forging // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 918. Article 012038.
14. Тишук Л.И., Соломонов К.Н. Влияние трения на формоизменение плоской заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 3. С. 251 – 253.
15. Solomonov K., Tishchuk L. Virtual and physical simulation forming of flat workpieces under upsetting // Procedia Manufacturing. 2019. No. 37. P. 467 – 471.
16. Solomonov K.N., Tishchuk L.I. Simulation of deformation processes in upsetting // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1348. Article 012020.
17. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Литвинова Н.Н. Исследование усилия протягивания оцинкованных полос на правильной машине агрегата непрерывного горячего цинкования // Металлург. 2014. № 5. С. 79 – 82.
18. Шаталов Р.Л., Генкин А.Л. Управление листопрокатным технологическим комплексом, обеспечивающее минимизацию энергозатрат // Металлург. 2008. № 9. С. 485 – 490.
19. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method // EUREKA: Physics and Engineering. 2019. No. 2. P. 52 – 60.

20. Чиченев Н.А. Импортозамещающий реинжиниринг привода роликов в промежуточном рольганге машины непрерывного литья заготовок // *Металлург*. 2015. № 9 – 10. С. 892 – 895.
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenev N. Improved copper-molybdenum composite material production technology // *Materials Today: Proceedings*. 2019. No. 11. P. 31 – 35.
22. Николаев В.А., Русаков А.Д., Чиченев Н.А. Прогнозирование твердости валков многовалковых станков // *Сталь*. 1996. № 9. С. 58 – 60.
23. Maheshwaran M.V., Hyness N.R.J., Sentharamaikkannan P. etc. Characterization of natural cellulose fiber from *Epipremnum aureum* stem // *Journal of Natural Fibers*. 2018. Vol. 15. No. 6. P. 789 – 798.
24. Manimaran P., Sanjay M.R., Sentharamaikkannan P. etc. A new study on characterization of *Pithecellobium dulce* fiber as composite reinforcement for light-weight applications // *Journal of Natural Fibers*. 2020. Vol. 17. No. 3. P. 359 – 370.
25. Fathy A., Le Pivert M., Kim Y.J. etc. Continuous monitoring of air purification: A study on volatile organic compounds in a gas cell // *Sensors (Switzerland)*. 2020. Vol. 20. No. 3. Article 934.
26. Chou C.-T., Hsu T.-F., Shen C.-Y. etc. Experimental study of high purity CO₂ concentration from syngas by a dual-bed six-step pressure swing adsorption process // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 330. No. 3. Article 032031.
27. Jacobs J.H., Wynnyk K.G., Lalani R. etc. Removal of sulfur compounds from industrial emission using activated carbon derived from petroleum coke // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58. No. 40. P. 18896 – 18900.
28. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. Vol. 19. No. 9. P. 2130 – 2150.
29. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification // *Engineering*. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 416 – 420.
30. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber // *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 52. No. 6. P. 515 – 523.
31. Chatlynne C.J., Mobley J.D., Stern R.D. Flue gas cleaning: Flue gas desulfurization (regenerable), NO_x, and SO_x/NO_x // *Thin Solid Films*. 2017. 13 p.
32. Gehri D.C., Dustin D.F., Katz B. Flue gas desulfurization and particulate control with the aqueous carbonate process // *Thin Solid Films*. 2017. 12 p.
33. Ma T., Huang Y., Deng S. etc. The relationship between selenium retention and fine particles removal during coal combustion // *Fuel*. 2020. Vol. 265. Article 116859.
34. Sobczyk A.T., Jaworek A., Marchewicz A. etc. Electrostatic agglomeration of fly ash particles for hybrid gas cleaning devices // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1322. No. 1. Article 012012.
35. Guan L., Yuan Z., Gu Z. etc. Numerical simulation of ash particle deposition characteristics on the granular surface of a randomly packed granular filter // *Powder Technology*. 2017. Vol. 314. P. 78 – 88.
36. Shi Y., Wang X., Chu D. etc. An experimental study of ash accumulation in flue gas // *Advanced Powder Technology*. 2016. Vol. 27. No. 4. P. 1473 – 1480.
37. Dobrzycki P., Ivannikov A.L., Rybak J. etc. The impact of Rapid Impulse Compaction (RIC) of large non-cohesive material deposits on the surrounding area // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 362. No.1. Article 012132.
38. Ivannikov A.L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 362. No. 1. Article 012130.
39. Batugin A., Myaskov A., Ignatov Y. etc. Re-using of data on rockbursts for up-to-date research of the geodynamic safety problem // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 221. No. 1. Article 012089.
40. Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. Spark erosion machining of miniature gears: A critical review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 80. No. 9 – 12. P. 1863 – 1877.
41. Трубецкой К.Н., Мясков А.В., Галченко Ю.П., Еременко В.А. Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // *Горный журнал*. 2019. № 5. С. 6 – 13.
42. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. URL: <http://government.ru/info/6217/> (дата обращения 25.03.2020).
43. Писаренко М.В., Шаكليен С.В. Производство и потребление угля в мире и России // *Горная промышленность*. 2015. № 2 (120). С. 24 – 27.
44. Угольная отрасль России. URL: <https://wtmoscow.ru/services/international-partnership/analytcs/ugolnaya-otrasl-rossii> (дата обращения 25.03.2020).
45. Гринпис составил антирейтинг стран по выбросам диоксида серы. URL: <https://www.mk.ru/social/2019/08/19/greenpeace-sostavil-antireyting-stran-po-vybrosam-dioksida-sery.html> (дата обращения 25.03.2020).
46. Колчина Е.Н. Нормативы выбросов в атмосферный воздух, процедура нормирования и разрешение на выбросы // *Справочник эколога*. 2013. № 3. С. 54 – 59.
47. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2018 г. – Санкт-Петербург, 2019. – 250 с.
48. Большая энциклопедия нефти и газа. URL: <http://ngpedia.ru/id481488p1.html>. (дата обращения 25.03.2020).
49. МУ 34-70-019-82. Методические указания по интенсификации золоулавливания в электрофильтрах и порядку планирования и организации работ по их реконструкции. 1982.
50. Экология. Справочник. URL: <https://ru-ecology.info/term/2702/> (дата обращения 25.03.2020).

Поступила в редакцию 27 марта 2020 г.
После доработки 27 марта 2020 г.
Принята к публикации 2 июня 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 6, pp. 451–457.

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF GAS PURIFICATION AND ASH COLLECTION IN RUSSIAN MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY

S.M. Gorbatyuk, P.S. Makarov, M.A. Sukhorukova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The problem of reducing emissions of sulfur dioxide from the flue gases of coal-fired TPPs is highly relevant for domestic energy

in connection with the annual increase in coal production. This article analyzes statistical data in the field of coal mining, describes the current state in the field of gas purification and ash collection in the mining and metallurgical industry of the Russian Federation. To regulate pollutant emissions by stationary sources in Russia, a system of maximum permissible and temporarily agreed emissions (MPE and ENV) was introduced. The country takes part in international programs

aimed at protecting the environment from the harmful effects of human activity. Despite the general dynamics of reducing air pollution in the Russian Federation, emissions from mining and metallurgical enterprises only increase. This is due to deficiencies in the technical condition and operation of dust and gas cleaning equipment at electric power enterprises. The main ones are the moral and physical deterioration of the equipment fleet, the need for reconstruction and modernization of devices. The average degree of flue gas cleaning from ash at Russian TPPs is 95.5 %, which is noticeably less than abroad. Efficiency of the gas treatment plants used does not meet modern environmental requirements. The flue gases at our TPPs are not cleaned from sulfur and nitrogen oxides; there are practically no devices for continuous monitoring of TPP emissions. The article provides the rationale for the transition of enterprises to the best available technologies (BAT) in the field of gas purification. The use of a gas conditioning system allows 30 – 40 % reduction in the amount of funds spent on the construction of electrostatic filters. In recent years, in connection with the advent of new technologies for burning coal, filters for the purification of hot gases made of ceramic materials have been created. We have analyzed the state of gas purification and ash collection in the mining and metallurgical industry of the Russian Federation and its impact on the atmosphere. An assessment of the current state of gas purification equipment at the enterprises was carried out.

Keywords: gas purification, ash collection, environmental efficiency, maximum permissible concentration (MPC), maximum permissible emission (MPE), IZA index, electrostatic filters, bag filters, wet dust collection.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-451-457

REFERENCES

1. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, no. 2, pp. 52–60.
2. Dragobetskii V., Zagirnyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018, vol. 7, no. 4, pp. 92–99.
3. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 646–650.
4. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Effective laser technology for making metal products and tools. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 306–312.
5. Naumova M.G., Basyrov I.I., Aliev Kh.B. Reengineering of the ore preparation production process in the context of “Almalyk MMC” JSC. *MATEC Web of Conferences*. 2018, 224, article 01030.
6. Naumova M.G., Morozova I.G., Zарapin A.Y., Borisov P.V. Copper alloy marking by altering its surface topology using laser heat treatment. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5-6, pp. 464–469.
7. Kryukov I.Y., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G. Mathematical model of the crystallizing blank’s thermal state at the horizontal continuous casting machine. *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 129, article 02010.
8. Busygin A.M. The force analysis of the caterpillar excavator stick arrangement mechanism with three degrees of freedom. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018, no. 1, pp. 133–142.
9. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.).
10. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 19, pp. 2405–2408.
11. Efremov D.B., Gerasimova A.A. Gorbatyuk S.M., Chichenev N.A. Study of kinematics of elastic-plastic deformation for hollow steel shapes used in energy absorption devices. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 18 pp. 30–34.
12. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Study of metal surface with color image obtained with laser marking. *Solid State Phenomena*. 2020, vol. 299, pp. 943–948.
13. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorinin N. Simulation of forming a flat forging. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017, vol. 918, article 012038.
14. Tishchuk L.I., Solomonov K.N. Influence of friction on shaping of a flat blank. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 3, pp. 251–253. (In Russ.).
15. Solomonov K., Tishchuk L. Virtual and physical simulation forming of flat workpieces under upsetting. *Procedia Manufacturing*. 2019, no. 37, pp. 467–471.
16. Solomonov K.N., Tishchuk L.I. Simulation of deformation processes in upsetting. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019, vol. 1348, article 012020.
17. Maksimov E.A., Shatalov R.L., Litvinova N.N. Study of the tractive forces applied to galvanized strip on a straightening machine in a continuous hot-galvanizing unit. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6, pp. 415–420.
18. Shatalov R.L., Genkin A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 9-10, pp. 485–490.
19. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, no. 2, pp. 52–60.
20. Chichenev N.A. Import-replacing re-engineering of the drive of the rollers in the intermediate roller table of a continuous bloom caster. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 9-10, pp. 892–895.
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenev N. Improved copper-molybdenum composite material production technology. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 11, pp. 31–35.
22. Nikolaev V.A., Rusakov A.D., Chichenev N.A. Forecasting a multi-roll mills rolls hardness. *Stal’*. 1996, no. 9, pp. 58–60.
23. Maheshwaran M.V., Hyness N.R.J., Senthamaraiannan P., Saravanakumar S.S., Sanjay M.R. Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem. *Journal of Natural Fibers*. 2018, vol. 15, no. 6, pp. 789–798.
24. Manimaran P., Sanjay M.R., Senthamaraiannan P., Yogesha B., Barile C., Siengchin S. A new study on characterization of *Pithecellobium dulce* fiber as composite reinforcement for light-weight applications. *Journal of Natural Fibers*. 2020, vol. 17, no. 3, pp. 359–370.
25. Fathy A., Le Pivert M., Kim Y.J., Ba M.O., Erfan M., Sabry Y.M., Khalil D., Leprince-wang Y., Bourouina T., Gnambodoe-Capochichi M. Continuous monitoring of air purification: A study on volatile organic compounds in a gas cell. *Sensors (Switzerland)*. 2020, vol. 20, no. 3, article 934.
26. Chou C.-T., Hsu T.-F., Shen C.-Y., Lee S.-H., Yang H.-S. Experimental study of high purity CO₂ concentration from syngas by a dual-bed six-step pressure swing adsorption process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 330, no. 3, article 032031.
27. Jacobs J.H., Wynnyk K.G., Lalani R., Sui R., Wu J., Montes V., Hill J.M., Marriott R.A. Removal of sulfur compounds from industrial emission using activated carbon derived from petroleum coke. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2019, vol. 58, no. 40, pp. 18896–18900.
28. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, vol. 19, no. 9, pp. 2130–2150.
29. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*. 2018, vol. 4, no. 3, pp. 416–420.

30. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber. *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2017, vol. 52, no. 6, pp. 515–523.
31. Chatlynne C.J., Mobley J.D., Stern R.D. Flue gas cleaning: Flue gas desulfurization (regenerable), NO_x, and SO_x/NO_x. *Thin Solid Films*, 2017, 13 p.
32. Gehri D.C., Dustin D.F., Katz B. Flue gas desulfurization and particulate control with the aqueous carbonate process. *Thin Solid Films*, 2017, 12 p.
33. Ma T., Huang Y., Deng S., Fu B., Luo G., Wang J., Hu H., Yuan C., Yao H. The relationship between selenium retention and fine particles removal during coal combustion. *Fuel*. 2020, vol. 265, article 116859.
34. Sobczyk A.T., Jaworek A., Marchewicz A., Krupa A., Czech T., Sliwiński L. Electrostatic agglomeration of fly ash particles for hybrid gas cleaning devices. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019, vol. 1322, no. 1, article 012012.
35. Guan L., Yuan Z., Gu Z., Yang L., Zhong W., Wu Y., Sun S., Gu C. Numerical simulation of ash particle deposition characteristics on the granular surface of a randomly packed granular filter. *Powder Technology*. 2017, vol. 314, pp. 78–88.
36. Shi Y., Wang X., Chu D., Sun F., Guo Z. An experimental study of ash accumulation in flue gas. *Advanced Powder Technology*. 2016, vol. 27, no. 4, pp. 1473–1480.
37. Dobrzycki P., Ivannikov A.L., Rybak J., Shkodkina V.O., Tyulyaeva Y. The impact of Rapid Impulse Compaction (RIC) of large non-cohesive material deposits on the surrounding area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012132.
38. Ivannikov A.L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012130.
39. Batugin A., Myaskov A., Ignatov Y., Khotchenkov E., Krasnoshtanov D. Re-using of data on rockbursts for up-to-date research of the geodynamic safety problem. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 221, no. 1, article 012089.
40. Gupta K., Jain N.K., Laubscher R.F. Spark erosion machining of miniature gears: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 80, no. 9-12, pp. 1863–1877.
41. Trubetskoi K.N., Myaskov A.V., Galchenko Y.P., Eremenko V.A. Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits. *Gornyi zhurnal*. 2019, no. 5, pp. 6–13. (In Russ.).
42. *Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda* [The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2020]. Available at URL: <http://government.ru/info/6217/>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
43. Pisarenko M.V., Shaklein S.V. Production and consumption of coal in the world and in Russia. *Gornaya Promyshlennost'*. 2015, no. 2 (120), pp. 24–27. (In Russ.).
44. *Ugol'naya otrasl' Rossii* [Russian coal industry]. Available at URL: <https://wtcmoscow.ru/services/international-partnership/analytcs/ugolnaya-otrasl-rossii>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
45. *Greenpeace sostavil antireiting stran po vybrosam dioksida sery* [Greenpeace compiled an anti-rating of countries for sulfur dioxide emissions]. Available at URL: <https://www.mk.ru/social/2019/08/19/greenpeace-sostavil-antireiting-stran-po-vybrosam-dioksida-sery.html>. (Accessed 25.03.2020.) (In Russ.).
46. Kolchina E.N. Air emission standards, standardization procedure and emission permit. *Spravochnik ekologiya*. 2013, no. 3, pp. 54–59. (In Russ.).
47. *Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2018 g.* [Annual state of air pollution in Russian cities in 2018]. St. Peterburg, 2019, 250 p. (In Russ.).
48. *Bol'shaya entsiklopediya nefi i gaza* [Big encyclopedia of oil and gas]. Available at URL: <https://ngpedia.ru/id481488p1.html>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).
49. *MU 34-70-019-82 Metodicheskie ukazaniya po intensivifikatsii zolulavlivaniya v elektrofilyakh i poryadku planirovaniya i organizatsii rabot po ikh rekonstruktsii* [Guidelines for the intensification of ash collection in electrostatic precipitators and the procedure for planning and organizing work on their reconstruction]. 1982. (In Russ.).
50. *Ekologiya. Spravochnik* [Ecology. Directory]. Available at URL: <https://ru-ecology.info/term/2702/>. (Accessed 25.03.2020). (In Russ.).

Information about the authors:

S.M. Gorbatyuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (sgor02@mail.ru)

P.S. Makarov, Postgraduate of the Chair “Engineering of Technological Equipment” (pavel13-rus@ya.ru)

M.A. Sukhorukova, Engineer of the Mining Institute (marinasuhruk242822@yandex.ru)

Received March 27, 2020

Revised March 27, 2020

Accepted June 2, 2020