Оригинальная статья / Original article
УДК 620.9:662.613.1
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-207-219

Повышение эффективности использования отходов тепловых электрических станций путем увеличения производительности работы установки по отпуску сухой золы

© А.Д. Мехряков, А.Н. Кудряшов, Т.В. Коваль
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – повышение эффективности использования отходов производства угольной энергетики на основе анализа работы установки по отпуску сухой золы Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутскэнерго». Испытания установки проводились при различных режимах работы котельных агрегатов в соответствии со стандартными методиками, принятыми на предприятии. Испытания установки показали, что котлоагрегат станционный № 3 (с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофильтров 90,46%) обеспечил следующую эффективность: подача золы составила 7,10 т/ч. При подаче золы от котлоагрегата № 4, работающего с паровой нагрузкой 421,8 т/ч при КПД электрофильтров 94,72%, – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегатов № 3 и № 4 с паровой нагрузкой, соответственно, 397,6 т/ч и 380,7 т/ч, и КПД электрофильтров, соответственно, 90,46% и 94,72% производительность установки составила 14,23 т/ч. В результате исследований были выявлены ограничения в работе установки. Так, скорость воздуха в пневмозолопроводе при транспортировке золы составила 8,0–8,5 м/с, что способствовало работе установки по отпуску сухой золы в пульсирующем режиме. В связи с этим было рекомендовано увеличить скорость воздуха путем увеличения его расхода через струйный насос или перехода на использование трубопровода меньшего диаметра. Анализируя данные испытаний, установлено, что производительность установки по отпуску золы зависит главным образом от паропроизводительности котельных агрегатов, а также от степени очистки дымовых газов в электрофильтрах котлов. Полученные результаты использованы для определения технического состояния, эффективности и надежности работы установки по отпуску сухой золы потребителям Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали.

Ключевые слова: энергетика, сухая зола, зола уноса, золошлаковые отходы, установка по отпуску золы, экология

Для цитирования: Мехряков А.Д., Кудряшов А.Н., Коваль Т.В. Повышение эффективности использования отходов тепловых электрических станций путем увеличения производительности работы установки по отпуску сухой золы. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2021. Т. 25. № 2. С. 207–219. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-207-219

Improving the waste utilisation efficiency of combined heat and power plants by increasing the performance of dry-ash output units

Anton D. Mekhryakov, Alexander N. Kudryashov, Tatyana V. Koval
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The study aims to improve the efficiency of waste utilisation from the coal-fired power industry based on an analysis of the dry-ash output unit operating at the Novo-Irkutsk Combined Heat and Power Plant, JSC “Irkutskenergo”. The unit was tested under various operating conditions of steam generating blocks following the standard methods adopted at the enterprise. The tests showed that the station steam generating block No. 3 (with a steam load of 409.2 t/h and an electrostatic precipitator efficiency of 90.46%) provided an ash supply efficiency of 7.10 t/h. When the ash is supplied from the steam generating block No. 4, operating at a steam load of 421.8 t/h and an electrostatic precipitator efficiency of 94.72%, the ash supply efficiency amounts to 9.19 t/h. Under the simultaneous operation of the steam generating blocks No. 3 and 4 at a steam load of 397.6 and 380.7 t/h, respectively, and an electrostatic precipitator efficiency of 90.46 and 94.72%, respectively, the unit efficiency was 14.23 t/h. As a result, limitations in the unit operation were identified. Thus, the airspeed in the pneumatic ash pipeline during ash transporting was 8.0–8.5 m/s, which facilitated the operation of the dry-ash output unit in a pulsed cycle. It was, therefore, recommended to increase the airspeed by accelerating the flow rate through the jet pump or by using a smaller diameter pipe. The conducted analysis showed that the efficiency of the dry-ash output unit depends mainly on the steam capacity of steam generating blocks, as well as on the

flue gas cleaning efficiency in the steam generator electrostatic precipitators. The obtained results were used to determine the technical state, efficiency and reliability of the dry-ash output unit of the Novo-Irkutsk Combined Heat and Power Plant.

Key words: power engineering, dry ash, fly ash, ash and slag waste, ash release installation, ecology

For citation: Mekhryakov AD, Kudryashov AN, Koval TV. Improving the waste utilisation efficiency of combined heat and power plants by increasing the performance of dry-ash output units. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2021;25(2):207–219. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-2-207-219

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые электрические станции (ТЭС) на твердом топливе играют важную роль в обеспечении потребности восточных регионов нашей страны в электрической и тепловой энергии. В качестве твердого топлива на ТЭС в основном используется уголь – самое распространенное в мире и в России энергетическое топливо [1, 2]. Согласно данным международного энергетического агентства[1], в настоящее время мир сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю[2]. Сегодня в мире уделяется большое внимание сжиганию твердого топлива[3] [3–9]. Россия является одним из мировых лидеров по производству угля, на долю нашей страны приходится примерно 5% мировой угледобычи [10]. Лидирующие позиции по объемам угледобычи занимают Китай, США и Индия. Россия находится на шестом месте по объемам добычи угля [10–13].

В процессе сгорания топлива происходят сложные химические и фазовые превращения его минерального вещества. В результате превращений минеральной части топлива образуются вещества с новыми свойствами – зола и шлак.

При сжигании угля в топках энергетических котлов ежегодно образуются десятки миллионов тонн золошлаковых отходов (ЗШО), являющихся серьезным источником загрязнения окружающей среды. Отвалы золошлаков ТЭС занимают большие площади, а их содержание требует значительных эксплуатационных затрат, которые влияют на повышение себестоимости производства энергоносителей.

Золы и шлаки, претерпев в топках термическую обработку при высоких температурах, аккумулируют в себе огромные запасы тепловой и химической энергии. При этом они становятся ценнейшим сырьем при переработке материалов, изделий и конструкций, пригодных для современного строительства.

Использование золы и шлаков ТЭС – задача весьма актуальная, что подтверждается многочисленными исследованиями российских и зарубежных специалистов [14–21]. При этом мировая практика подтвердила высокую эффективность применения золы ТЭС в производстве строительных материалов [16–19]. Минимизации экологических последствий от промышленных отходов можно достичь только полной их утилизацией. Поэтому многие развитые страны пошли по пути использования в качестве минерального сырья не природных, а техногенных материалов и изготовления из них принципиально новых видов высококачественной продукции. Россия в этом отношении значительно уступает многим странам [8, 10–13].

В Западной Европе и Японии при ТЭС практически ликвидированы золоотвалы. Сухая зола поступает в силосы, построенные рядом с главными корпусами ТЭС.

Организованная система утилизации золошлаковых материалов позволит решить сложную проблему снижения значительных издержек энергетической компании на строительство и эксплуатацию золоотвалов.

---

[1]Medium Term Coal Market Report 2016. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p. https://doi.org/10.1787/mtrcoal-2016-en (20.09.2020).
[2]Coal information: overview. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. https://doi.org/10.1787/coal-2017-en (20.09.2020).
[3]The US Coal Crash – Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p. [Электронный ресурс]. URL: https://carbontracker.org/reports/the-us-coal-crash/ (20.09.2020).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поиск методов утилизации золы требует знания ее физико-химических свойств. Главные составляющие золошлаковых материалов – это оксиды: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO. Небольшая доля приходится на сульфаты $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$; в меньших количествах присутствуют фосфаты, оксиды щелочных металлов. Зола практически включает все элементы периодической таблицы Д.И. Менделеева. В золошлаковых материалах могут содержаться биогенные (фтор, марганец, кобальт, свинец, медь и др.) и токсические микроэлементы (бор, ванадий, мышьяк, стронций, бериллий и др.).

Элементарный состав ЗШО сильно изменяется в зависимости от вида используемых углей, технологии сжигания и удаления отходов. Зола одного и того же вида угля имеет разные свойства, тем более от разных видов углей [1].

Особую роль в формировании свойств золы играют гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, кальцит $CaCO_3$ и доломит $CaMg(CO_3)_2$, а также продукты их частичного термического разложения – ангидрит $Ca(OH)_2$ и свободный оксид кальция CaO. В золе всех типов содержатся сульфаты и карбонаты кальция.

Из новообразованных материалов следует отметить так называемые клинкерные минералы – силикаты, алюминаты и ферриты кальция различной основности, определяющие способность намываемых золошлаковых материалов к самопроизвольной цементации.

Практически во всех золах содержатся органические включения (недожог) в виде кокса и полукокса – в форме либо самостоятельных частиц, либо включений в крупные фракции золы.

Проблема утилизации зольных масс тепловых электростанций остается весьма актуальной задачей для современных городов Сибири. Зольные массы занимают большие участки дорогостоящей земли вблизи городов, нарушая экологическое равновесие и загрязняя почвы, грунтовые и поверхностные воды.

В развитых странах не стремятся переводить станции, работающие на угле, на газ и мазут. Более того, и у нас, и за рубежом, все больше ученых, экологов утверждают, что ТЭЦ, работающие на твердом топливе [2, 3, 5], должны рассматриваться как предприятия энерготехнологического комплекса регионов. Они кроме выработки тепловой и электрической энергии должны способствовать производству из побочных продуктов строительных материалов.

Золошлаковые отходы могут использоваться как добавки и наполнители при производстве большого перечня строительных материалов: цемента, бетонов, растворов, кирпича и т.д. Они хорошо себя зарекомендовали при укладке в земляное полотно автомобильных дорог. Определенную ценность ЗШМ имеют в сельском хозяйстве при производстве удобрений. Очень перспективной является глубокая (комплексная) переработка ЗШО с получением глинозема, кремнезема, концентрата железа и целого ряда редкоземельных материалов. Известно более 300 технологий использования ЗШО.

Безотходное использование ископаемых углей особенно выгодно государству со стратегической точки зрения, поскольку без дополнительных затрат удвоится объем производства вяжущих материалов, кроме того, за счет угля значительно снизится потребление газа внутри страны, что позволит увеличить объемы его продаж за рубеж [1].

Более 40 лет зола-унос и золошлаковая смесь с золоотвала ТЭЦ-1 ПАО «Иркутскэнерго» успешно используются в производстве цемента на ОАО «Ангарскцемент». В настоящее время золошлаковые отходы, накопленные на территории Иркутской области, используются при тушении полигона лигнина в г. Зима. Планируется использование ЗШО при строительстве железнодорожного подъездного пути на ТЭЦ-10 ПАО «Иркутскэнерго» от станции «Суховская», автодороги Иркутск – Листвянка.

Одним из направлений повышения эффективности использования отходов тепловых электрических станций Иркутской области может быть увеличение производительности работы установки по отпуску сухой золы. Одна такая установка находится на Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутскэнерго» (Н-И ТЭЦ).

ИССЛЕДОВАНИЯ

На Н-И ТЭЦ установлено 8 котлоагрегатов, из них БКЗ-420-140 ст. № 1–4 (ст. № – станционный номер), БКЗ-500-140 ст. № 5–7, БКЗ-820-140 ст. № 8. В настоящее время на Н-И ТЭЦ сжигают в азейский, мугунский и ирбейский бурые угли. Котельные агрегаты Н-И ТЭЦ ст. № 1, 2 оборудованы золоулавливающими установками МВ[4] УО «ОРГРЭС» (установки по отпуску мокрых золоуловителей с трубами Вентури типа МВ – скрубберы с трубами Вентури), на котлах ст. № 3–8 – электрофильтры.

Первоначально установка по отпуску сухой золы (УОСЗ) предполагала отбор сухой золы от электрофильтров котлоагрегатов ст. № 3–8 и транспортирование на склад сухой золы, расположенный вне главного корпуса. Протяженность трассы пневмопроводов от места забора в главном корпусе до осадительных бункеров на складе золы составляет около 150 м.

В настоящее время проект разработан и введен в эксплуатацию для 1-й очереди установки по отпуску сухой золы, то есть от котельных агрегатов ст. № 3, 4.

Поскольку установленные с котлоагрегатами ст. № 3, 4 электрофильтры двухкорпусные, то золоудаление выполнено для каждого корпуса самостоятельным, то есть по две золоудаляющих системы на каждом котле.

Установка по отпуску сухой золы 1-й очереди включает следующие узлы:

– установка по отбору сухой золы в главном корпусе;

– склад сухой золы;

– эстакады пневмозолопроводов;

– установка аварийного сброса золы в багерной насосной № 1;

– оборудование и трубопроводы сжатого воздуха.

Принципиальная схема установки по отбору сухой золы 1-й очереди представлена на рисунке. В настоящее время на каждой золоудаляющей системе установлено по одному циклону (Ц) D_y = 530 мм над промбункерами (ПБ).

Пневмозолопроводы от бункеров электрофильтров входят в промбункеры на той же отметке, что и в циклоны.

В циклоне происходит гашение и оседание столба золы, которая подается через мигалку (М) в ПБ. Запыленный воздух из циклона трубопроводом D_y = 200 мм направляется в газоход перед электрофильтром.

Далее для разделения систем пневмозолоудаления (ПЗУ) и гидрозолоудаления (ГЗУ) под промбункером устанавливается двухходовый переключатель, с помощью которого сбрасывается зола или в золосмеситель, или в струйный насос (СтрН), установленный рядом с золосмесителем.

Производительность струйного насоса зависит от высоты столба золы до него. Проектная высота столба золы составляет около 4 м, а производительность, соответственно, 7–8 т/ч, что в два раза больше, чем часовой выход золы на один корпус электрофильтра (на азейском угле с учетом форкамеры 4 т/ч или 4,4 м^3/ч при насыпной плотности золы 0,9 т/м^3).

В главном корпусе установлены 4 струйных насоса, от которых по четырем пневмозолопроводам D_y = 150 мм зола направляется на склад сухой золы.

Бункер сухой золы (БСЗ) рассчитан на установку 4-х силосов емкостью 100 м^3 каждый. В настоящее время для 1-й очереди (котельные агрегаты ст. № 3, 4) установлены 2 силоса: БСЗ-1 и БСЗ-2.

Склад сухой золы находится на расстоянии около 30 м от главного корпуса.

Для трассировки и крепления пневмозолопроводов установлены две стойки, размещенные между газоходами котлоагрегатов ст. № 3, 4.

Каждый пневмозолопровод перед врезкой в силос делится на два, для чего предусмотрены двухходовые переключатели силоса (ПДс), которые позволяют сбрасывать золу из каждого корпуса электрофильтра на оба силоса.

Загрузка золы в автоцементовозы произ-

[4]Указания по расчету и проектированию золоуловителя с трубой Вентури типа МВ при модернизации газоочистного оборудования тепловых электростанций. Утв. 10.10.1978. М.: «Уралтехэнерго», Всесоюз. теплотехн. ин-т им. Ф.Э. Дзержинского.

водится под силосом, для чего предусмотрен затвор дисковый (ЗД) с электроприводом, что позволяет дистанционно управлять разгрузкой золы. Дисковый затвор соединен гибким шлангом с загрузочным устройством (ЗУ). Последнее устанавливается на горловину загрузочного патрубка автоцементовоза.

Вытесненный из автоцементовоза при загрузке запыленный воздух забирается вентилятором, соединенным гибким шлангом с загрузочным устройством и далее направляется обратно в силос.

Запыленный воздух из силосов, проходя через рукавные фильтры, вентилятора-ми выбрасывается в атмосферу.

Рукавные фильтры и вентиляторы размещаются в отдельном помещении на отметке 12,6 м.

Организация транспортирования и отгрузки сухой золы осуществляется следу-ющим образом. Процесс транспортирования золы от котлоагрегатов ст. № 3, 4 на склад автоматизирован. Управление электроприводами арматуры компрессоров осуществляется со щитов контрольно-измерительными приборами, расположенных в отдельном помещении, пристроенном к багерной насосной № 1.

Поскольку ограничения, связанные со стесненными условиями при размещении вновь запроектированного оборудования в главном корпусе, не позволили установить промбункеры необходимого объема, то процесс автоматизации транспортирования золы от котлоагрегатов ст. № 3, 4 сведен к организации поочередного опорожнения промбункеров по каждой линии (всего 4 линии ПЗУ с котлоагрегатов ст. № 3, 4), начиная с верхнего уровня первого промбункера и далее через 8 мин включения каждой последующей линии транспортирования золы.

Промежуток времени в 24 мин выбран из расчета емкости промбункеров: при выходе золы от одного корпуса электрофильтра 4,4 м^3/ч или 0,07 м^3/мин – фактически этот объем составляет 1,6 м^3.

Так как для 1-й очереди УОСЗ установлено два силоса емкостью по 100 м^3 каждый, то заполнение одного силоса происходит за 6 ч (ориентировочно выход очаговых остатков от котлоагрегатов ст. № 3, 4 равен 4,4 · 4 = 17,6 м^3/ч), а разгрузка происходит за 4 ч при интервале 1 машина/40 мин или 12 машин (144 т)/1 смена.

Таким образом, при непрерывной двухсменной загрузке автоцементовозов количество загруженных машин составит 24 шт. (заполнение силосов поочередное).

В промежуток времени между сменами (ночное время) происходит заполнение силосов или переключение системы на ГЗУ.

В начале 2018 г. были проведены испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения ее технической производительности с последующим повышением производительности. Испытания УОСЗ проводились при различных режимах работы котельных агрегатов с организацией подачи золы отдельно от котлоагрегата ст. № 3, от котлоагрегата ст. № 4 и одновременной подачи от котлоагрегатов ст. № 3, 4.

Также были проведены опыты по определению расхода воздуха и аэродинамического сопротивления в пневмозолопроводах котлоагрегатов № 3, 4 и отсасывающем трубопроводе. Опыты проводились при следующих режимах:

1. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-3А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофильтра котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат ст. № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Воздух от струйного насоса по пневмозолопроводу подавался в БСЗ-1.

2. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофильтров котлоагрегата № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Воздух от струйного насоса по пневмозолопроводу подавался в БСЗ-1.

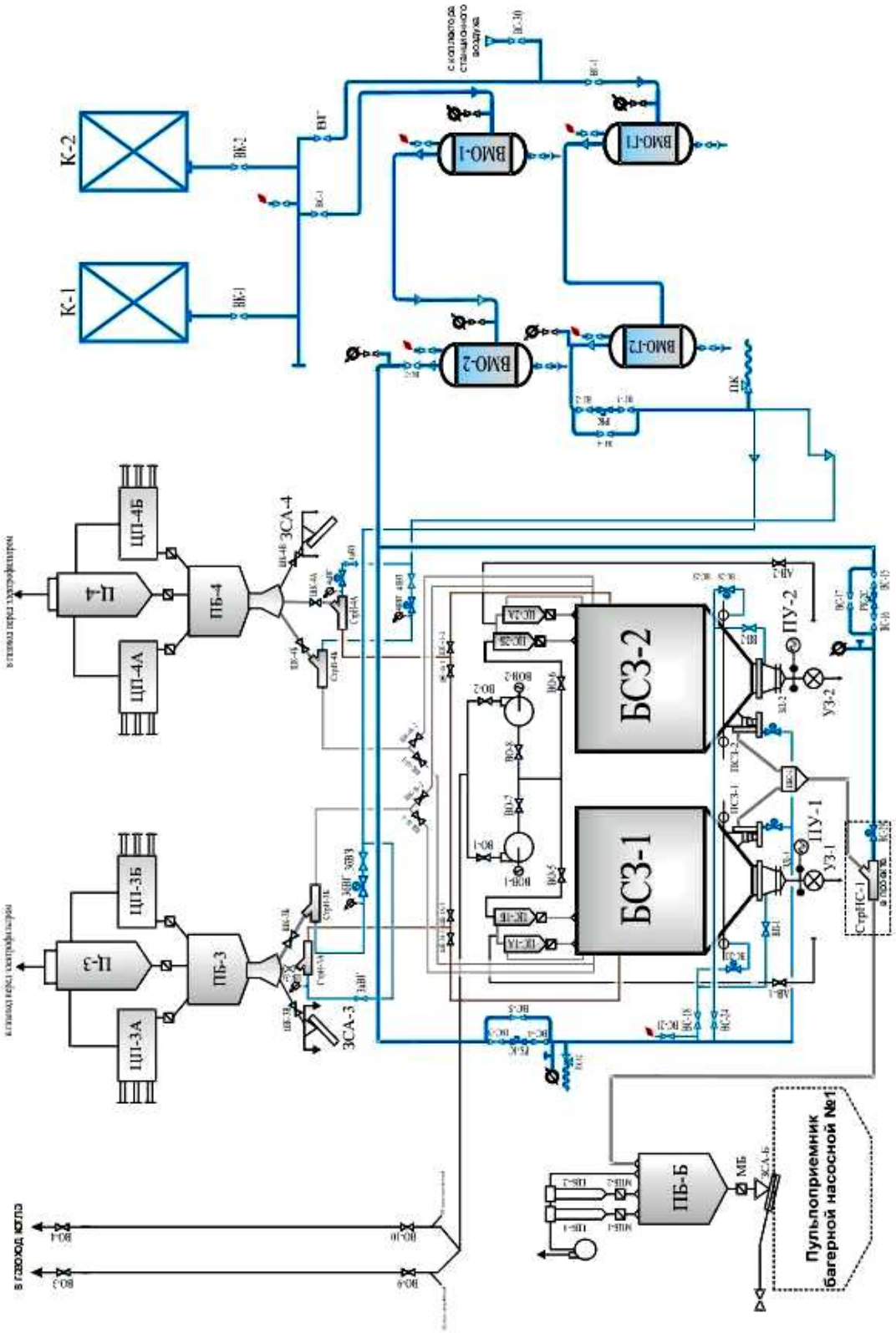


Схема установки отпуска сухой золы
Dry ash release installation diagram

3. В работе были струйные насосы СтрН-3А, СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Промбункер электрофильтра котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ, котлоагрегат ст. № 4 находился в останове. Воздух на струйные насосы подавался от коллектора станционного воздуха. Воздух от струйных насосов по пневмозолопроводам подавался в БСЗ-1.

Определение технической производительности установки проводилось при следующих режимах:

1. В работе были компрессор К-2, струйный насос СтрН-3А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункера электрофильтров котлоагрегата ст. № 3 срабатывалась через пневмозолопровод в БСЗ-1, котлоагрегат № 4 находился в останове. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Тепловая нагрузка котлагрегата ст. № 3 поддерживалась постоянной при $D_{пп}$ = 409 т/ч.

2. В работе были компрессор К-1, струйный насос СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункера электрофильтров котлоагрегата ст. № 4 срабатывалась через пневмозолопровод в БСЗ-1, промбункер электрофильтров котлоагрегата ст. № 3 опорожнялся через золосмывной аппарат в канал ГЗУ. Арматура на трубопроводе сжатого воздуха от общестанционной сети была закрыта. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 4 поддерживалась постоянной при $D_{пп}$ = 421 т/ч.

3. В работе были струйные насосы СтрН-3А, СтрН-4А, вентилятор очищенного воздуха ВОВ-1. Зола из промбункеров электрофильтров котлоагрегатов ст. № 3, 4 срабатывалась через пневмозолопроводы в БСЗ-1. Воздух на струйные насосы подавался от коллектора станционного воздуха. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 3 поддерживалась постоянной при $D_{пп}$ = 398 т/ч, $t_{пп}$ = 550°С. Тепловая нагрузка котлоагрегата ст. № 4 поддерживалась постоянной при $D_{пп}$ = 381 т/ч.

Контроль уровней золы в БСЗ-1 и БСЗ-2 показал увеличение уровней обоих бункеров в режиме наполнения БСЗ-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных испытаний установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения ее технической производительности с последующим повышением производительности были получены результаты, которые представлены в табл. 1–3.

Испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определения технической производительности показали, что производительность УОСЗ при работе от котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофильтров 90,46% составила 7,10 т/ч, а при работе от котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 421,8 т/ч и КПД электрофильтров 94,72% – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 397,6 т/ч КПД электрофильтров 90,46% и котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 380,7 т/ч, КПД электрофильтров 94,72% производительность УОСЗ составила 14,23 т/ч. Таким образом, производительность установки преимущественно зависит от паропроизводительности котельных агрегатов, зола от которых транспортируется на склад сухой золы, а также, анализируя полученные данные (представленные в табл. 1–3), можно отметить, что на производительность оказывает значительное влияние на степень очистки дымовых газов в электрофильтрах котельных агрегатов.

Необходимо отметить некоторые особенности в работе установки:

– шаровые краны пневмозолопроводов не обеспечивали полное перенаправление потока золовоздушной смеси;

– скорость воздуха в пневмозолопроводе при транспортировке золы от струйных насосов котлоагрегатов ст. № 3, 4 до БСЗ-1,2 составляла 8,0–8,5 м/с, которая не обеспечивала надежный режим работы установки – установка работала в пульсирующем режиме;

– скорость воздуха в трубопроводе очищенного воздуха от напора ВОВ-1,2 до сброса в газоход котельного агрегата на участке за электрофильтром составляла 22,0 м/с, что

Таблица 1. Расчет технической производительности установки по отпуску сухой золы
Table 1. Calculation of technical capacity of the dry ash release installation

Параметр	Обозначение	Размер	Формула или обоснование	Значение			
				СтрН-3А	СтрН-4А	СтрН-3А	СтрН-4А
				к/а № 3	к/а № 4	к/а № 3, 4	
Расход перегретого пара	$D_{ПП}$	т/ч	данные испытаний	409,2	421,8	397,6	380,7
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы через струйный насос	$G_{ЗЛ}^{КА}$	кг/с	табл. 3	1,993	2,579	1,948	2,047
Коэффициент полезного действия котельного агрегата (брутто)	$\eta_{КА}$	%	$\eta_{КА}=100-\sum q,$ значения потерь получены на основе анализа топлива и дымовых газов	93,328	92,978	92,708	92,971
Степень очистки дымовых газов (с учетом неработающих полей)	$\eta_{ЭФ}$	–	табл. 2	0,9046	0,9472	0,9046	0,9472
Расчетный расход топлива	B_P	т/ч	$B_P=\frac{Q_К}{Q_P\cdot\frac{\eta_{КА}}{100}}\cdot\left(1-\frac{q_4}{100}\right)\cdot 10^3$	67,4	68,9	59,6	59,9
Массовый расход золы от к/а	$G_{ЗЛ}^{КА}$	т/ч	$G_{ЗЛ}^{КА}=B_P\cdot\alpha_{УН}\cdot A^Г$	7,94	9,81	7,76	7,79
		кг/с		2,207	2,726	2,156	2,164
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы	$G_{ЗЛ}$	т/ч	$G_{ЗЛ}=G_{ЗЛ}^{КА}-\left(G_{ЗЛ}^{КА}+G_{ЗЛ}^{ВОЗВР}\right)\cdot\left(1-\eta_{ЭФ}\right)$	7,18	9,29	7,01	7,37
		кг/с		1,993	2,579	1,948	2,047
Массовый расход золы в БСЗ-1	$G_{ЗЛ}^{БСЗ-1}$	кг/с	$G_{ЗЛ}^{БСЗ-1}=\sum G_{ЗЛ}$	1,993	2,579	3,995	
Степень очистки воздуха осадительной станции БСЗ-1	$\eta_{БСЗ-1}$	–	табл. 3	0,9894			
Техническая производительность установки по отпуску сухой золы	$G_{ЗЛ}^{УОСЗ}$	кг/с	$G_{ЗЛ}^{УОСЗ}=G_{ЗЛ}^{БСЗ-1}\cdot\eta_{БСЗ-1}$	1,972	2,552	3,953	
		т/ч		7,10	9,19	14,23	

обеспечивало режим работы без образования подстилающего слоя;

– объемный расход воздуха через вентилятор очищенного воздуха превышал расход воздуха через пневмозолопроводы;

– производительности компрессорной установки было недостаточно для одновременной работы двух насосов;

– производительности вентилятора очищенного воздуха (ВОВ-1,2) было достаточно для аспирации воздуха из силосов при одновременной работе струйных насосов котлоагрегатов ст. № 3, 4;

– возврат очищенного воздуха осуществлялся в газоход котельного агрегата на участке за электрофильтром;

– местами нарушена тепловая изоляция трубопроводов.

В результате анализа полученных результатов для увеличения производительности установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ было рекомендовано провести следующие мероприятия:

– увеличить скорость воздуха в пневмозолопроводе для обеспечения режима работы установки без образования подстилающего слоя. При измеренных режимах работы (концентрации золы в золовоздушной смеси)

Таблица 2. Расчет степени очистки газов в корпусах электрофильтров котлоагрегатов ст. № 3, 4
Table 2. Calculation of gas purification degree in electric filter casings of boilers at the station no. 3, 4

Параметр	Обозначение	Размер	Формула или обоснование	Значение	
				котлоагрегат ст. № 3	котлоагрегат ст. № 4
Степень очистки дымовых газов (при всех работающих полях)	$\eta_{ЭФ}^{МАКС}$	–	данные испытаний	0,9807	0,9802
Количество полей в одном корпусе электрофильтра	$N^{НОМ}$	шт	характеристика оборудования	4	4
Степень очистки одного поля	$\eta_{П}$	–	$\eta_{П}=1-\left(1-\eta_{ЭФ}^{МАКС}\right)^{1/N^{НОМ}}$	0,627274	0,624883
Кол-во работающих полей в корпусе А	$N^{А}$	шт	данные Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутскэнерго»	2	3
Кол-во работающих полей в корпусе Б	$N^{Б}$	шт	данные Ново-Иркутской теплоэлектроцентрали ПАО «Иркутскэнерго»	3	3
Степень очистки дымовых газов (с учетом неработающих полей*)	$\eta_{ЭФ}$	–	$\eta_{ЭФ}=1-\left(\left(1-\eta_{П}\right)^{N^{А}}+\left(1-\eta_{П}\right)^{N^{Б}}\right)\Big/2$	0,9046	0,9472

Примечание: *В период проведения испытаний с 21.03.18 по 18.05.18 были отключены поля 1А, 3А, 3Б электрофильтра котлоагрегата ст. № 3 и поля 2А, 1Б электрофильтра котлоагрегата ст. № 4.

и существующего трубопровода Ø159×9 мм минимальная скорость воздуха рекомендуется 21,0–32,3 м/с [14–16, 20]. Скорость воздуха возможно увеличить путем возрастания расхода через струйный насос или переходом на трубопровод меньшего диаметра. Для увеличения расхода через трубопровод Ø159×9 мм при избыточном давлении сжатого воздуха перед насосом 0,2942 Н/мм^2 (3,0 кгс/см^2) расчетный диаметр сопел составляет 25–28 мм, расчетный расход воздуха на 1 насос при этом составляет 22–26 м^3/мин;

– провести ревизию шаровых кранов, установленных на пневмозолопроводах, которые должны обеспечивать полное открытие и полное перекрытие золовоздушного потока;

– провести ревизию струйных насосов. При этом установить сопло эжектирующего воздуха, конфузор, камеру смешения и диффузор соосно пневмолозопроводу. В случае замены фильтровальной ткани аэроднища рекомендовалось рассмотреть возможность установки металлической беспровальной сетки для более надежной работы;

– выявить и устранить места присоса воздуха в БСЗ-1, БСЗ-2 и трубопроводе очищенного воздуха на участке перед вентилятором.

Кроме того, необходимо изменить схему возврата очищенного воздуха – трубо-провод очищенного воздуха завести в газоход котельного агрегата на участке до электрофильтра или в форкамеру электрофильтра, а также восстановить изоляцию пневмозолопроводов и трубопровода очищенного воздуха на участках от стены зда-ния цеха до склада сухой золы.

Для снижения абразивного износа напорных пневмозолопроводов было предложено рассмотреть возможность их замены на трубопроводы, выполненные из более износостойких материалов, например трубы с алюмотермическим покрытием или трубы с каменным литьем [11, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения использования отходов [21] тепловых электрических станций в Иркутской области выполнена оценка работы установки по отпуску сухой золы Н-И ТЭЦ с целью увеличения ее производительности.

Испытания установки по отпуску сухой золы потребителям Н-И ТЭЦ для определе-

Таблица 3. Определение степени очистки воздуха в осадительной станции БСЗ-1
Table 3. Determination of air purification degree in the Dry Ash Hopper-1 precipitation station

Параметр	Обозначение	Размер	Формула или обоснование	Значение
Масса фильтра до опыта	$M_{Ф}^{ОВ'}$	г	данные испытаний	0,1076
Масса фильтра после опыта	$M_{Ф}^{ОВ''}$	г	данные испытаний	0,4148
Масса золы, отделенная фильтром	$\Delta M_{Ф}^{ОВ}$	г	$\Delta M_{Ф}^{ОВ} = M_{Ф}^{ОВ''} - M_{Ф}^{ОВ'}$	0,3072
Объем отобранной пробы	$V_{П}^{ОВ}$	м^3	данные испытаний	0,005
Концентрация золы в воздухе	$\mu_{ЗЛ}^{ОВ}$	г/м^3	$\mu_{ЗЛ}^{ОВ} = \frac{\Delta M_{Ф}^{ОВ}}{V_{П}^{ОВ}}$	61,4
		кг/м^3		0,0614
Диаметр трубопровода внешний	$D_{ОВ}$	мм	данные испытаний	219
Толщина стенки трубопровода	$s_{ОВ}$	мм	данные испытаний	9,5
Диаметр трубопровода внутренний	$d_{ОВ}$	мм	$d_{ОВ} = D_{ОВ} - 2 \cdot s_{ОВ}$	200
		м		0,2
Площадь сечения трубопровода	$F_{ОВ}$	м^2	$F_{ОВ} = \frac{\pi d_{ОВ}^2}{4}$	0,031416
Скорость воздуха в трубопроводе	$\omega_{ОВ}^{В}$	м/с	данные испытаний	22
Объемный расход воздуха в трубопроводе очищенного воздуха	$Q^{ОВ}$	м^3/с	$Q^{ОВ} = \omega_{ОВ}^{В} \cdot F_{ОВ}$	0,6912
Массовый расход золы в трубопроводе очищенного воздуха	$G_{ЗЛ}^{ОВ}$	кг/с	$G_{ЗЛ}^{ОВ} = \mu_{ЗЛ}^{ОВ} \cdot Q^{ОВ}$	0,0425
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы от котлоагрегата № 3	$G_{ЗЛ}^{КА3}$	кг/с	табл. 2	1,948
Массовый расход золы в установке по отпуску сухой золы от котлоагрегата № 4	$G_{ЗЛ}^{КА4}$	кг/с	табл. 2	2,047
Массовый расход золы в БСЗ-1	$G_{ЗЛ}^{БСЗ-1}$	кг/с	$G_{ЗЛ}^{БСЗ-1} = G_{ЗЛ}^{КА3} + G_{ЗЛ}^{КА4}$	3,995
Степень очистки воздуха осадительной станции БСЗ-1	$\eta_{БСЗ-1}$	–	$\eta_{БСЗ-1} = \frac{G_{ЗЛ}^{БСЗ-1} - G_{ЗЛ}^{ОВ}}{G_{ЗЛ}}$	0,9894

ния технической производительности показали, что производительность УОСЗ при работе от котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 409,2 т/ч и КПД электрофильтров 90,46% составила 7,10 т/ч, а при работе от котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 421,8 т/ч и КПД электрофильтров 94,72% – 9,19 т/ч. При одновременной работе котлоагрегата ст. № 3 с паровой нагрузкой 397,6 т/ч КПД электрофильтров 90,46% и котлоагрегата ст. № 4 с паровой нагрузкой 380,7 т/ч, КПД электрофильтров 94,72% производительность УОСЗ составила 14,23 т/ч.

На основании проведенных испытаний проведен анализ полученных результатов, определена производительность установки, степень очистки воздуха в осадительной станции БСЗ-1, аэродинамические характеристики пневмозолопроводов и трубопровода очищенного воздуха. Полученные результаты использованы для определения технического состояния, эффективности и надежности работы установки.

Список литературы

1. Яновский А.Б. Уголь: битва за будущее // Уголь. 2020. № 8. С. 9–14. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-9-14
2. Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 6. С. 37–44.
3. Табакаев Р.Б., Хаустов С.А., Черкашина Г.А., Казаков А.В. Низкосортное топливо Томской области: перспективы энергетического использования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 106–113.
4. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Головтеева А.Н., Сиваковский А.М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 60–72. https://doi.org/10.1134/S0040363619040064
5. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органовугольные топливные композиции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 72–82.
6. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qing. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O_2/H_2O atmospheres // Fuel. 2015. Vol. 139. P. 198–205. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038
7. Briceland C.L., Khinkis M., Waibel R.T. Combustion characteristics of fine-ground coal // Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size). 1982. [Электронный ресурс]. URL: https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustion-characteristics-fine-ground-coal-projectquarterly-technical-report-march-may-effect-particlesize (20.09.2020).
8. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // Уголь. 2018. № 3. С. 58–73. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73
9. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospheric Environment. 2014. Vol. 92. P. 449–460. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057
10. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // Уголь. 2021. № 3. С. 27–43. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43
11. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // Уголь. 2017. № 8. С. 10–14. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14
12. Таразанов И.Г., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2019 года // Уголь. 2020. № 3. С. 54–69. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69
13. Глинина О.И. Угольная промышленность в России: 295 лет истории и новые возможности // Уголь. 2017. № 10. С. 4–11. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10
14. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Добронравов А.Д., Шамсутдинов Э.В. Комплексное использование золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С. 26–36. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-26-36
15. Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Сударева С.В. Методы обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭС и пути их вовлечения в хозяйственный оборот (обзор) // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 3–24. https://doi.org/10.1134/S0040363619030056
16. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Качурин Н.М., Стась Г.В. Параметры активации золы уноса в качестве вяжущего при изготовлении бетонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 8. С. 173–179. https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2223
17. Bowman S.D. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) // Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologichazard ordinances in Utah. Utah: The University of Utah, 2016. P. 198–203.
18. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 87. No. 1. P. 717–725. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.080
19. Da Silva P.R., De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler // Advances in Concrete Construction. 2013. Vol. 1. Iss. 1. P. 65–84. https://doi.org/10.12989/acc.2013.1.1.065
20. Хаглеев Е.П. Золошлакоотвалы годичного регулирования дифференцированных потоков золы и шлака угольных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 21–32. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-7-8-21-32
21. Коваль Т.В., Абдульменова А.К. Использование отходов ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» // Молодежный вестник ИрГТУ. 2020. Т. 10. № 1. С. 126–130.

References

1. Yanovsky AB. Coal: the battle for the future. *Ugol'*. 2020;8:9–14. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-8-9-14 (In Russ.)
2. Kuznetsov AV, Butakov EB. Investigation of mechanical activation influence on coal fuel combustion. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327(6):37–44. (In Russ.)
3. Tabakaev RB, Khaustov SA, Cherkashina GA, Kaza-

kov AV. Low-grade fuels of Tomsk region: prospects for energy use. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2015;326(9):106–113. (In Russ.)
4. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Golovteeva AN, Sivakovskii AM. Optimal Choice of the Best Available Technologies for Russian Thermal Power Plants. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;4:60–72. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0040363619040064
5. Kurgankina MA, Vershinina KYu, Ozerova IP, Medvedev VV. Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):72–82. (In Russ.)
6. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qing. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O_2/H_2O atmospheres. *Fuel*. 2015;139:198–205. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038
7. Briceland CL, Khinkis M, Waibel RT. Combustion characteristics of fine-ground coal. In: *Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size)*. 1982. Available from: https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustioncharacteristics-fine-ground-coal-project-quarterlytechnical-report-march-may-effect-particle-size [Accessed 20th September 2020].
8. Tarazanov IG. Russia's coal industry performance for January - December, 2017. *Ugol'*. 2018;3:58–73. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73
9. Guttikunda SK, Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*. 2014;92:449–460. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057
10. Tarazanov IG. Gubanov DA. Russia's coal industry performance for January - December, 2020. *Ugol'*. 2021;3:27–43. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43 (In Russ.)
11. Yanovskii AB. Main trends and prospects of the coal industry development in Russia. *Ugol'*. 2017;8:10–14. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14
12. Tarazanov IG. Gubanov DA. Russia's coal industry performance for January - December, 2019. *Ugol'*. 2020;3:54–69. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-3-54-69 (In Russ.)
13. Glinina OI. The Coal Industry in Russia: 295 years history and new opportunities. *Ugol'.* 2017;10:4–11. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10
14. Afanaseva OV, Mingaleeva GR, Dobronravov AD, Shamsutdinov EV. Complex use of ash and slag waste. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(7-8):26–36. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-7-8-26-36
15. Ryabov YuV, Delitsyn LM, Ezhova NN, Sudareva SV. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review). *Teploenergetika = Thermal Engineering.* 2019;3:3–24. https://doi.org/10.1134/S0040363619030056
16. Golik VI, Dmitrak YuV, Kachurin NM, Stas GV. Parameters of ash drain activation as a binder when making a concrete. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019; 330(8):173–179. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2223
17. Bowman SD. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR). In: *Background and Application: guidelines for investigating geologic hazards and preparing engineering geology reports, with a suggested approach to geologichazard ordinances in Utah*. Utah: The University of Utah; 2016, p. 198–203.
18. Rashad AM. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of e levated temperatures and thermal shock cycles. *Journal of Cleaner Production*. 2015;87(1):717–725. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.080
19. Da Silva PR, De Brito J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler. *Advances in Concrete Construction*. 2013;1(1):65–84. https://doi.org/10.12989/acc.2013.1.1.065
20. Khagleev EP. Ash-slag dumps with annual regulation differentiated flows of ash and slag coal power station. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology.* 2017;19(7-8):21–32. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-7-8-21-32
21. Koval TV, Abdulmenova AK. Use of heat station waste in the case of PJSC Irkutskenergo. *Molodezhnyj vestnik IrGTU.* 2020;10(1):126–130. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мехряков Антон Дмитриевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: mehryakov-ad@irkutskenergo.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton D. Mekhryakov,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: mehryakov-ad@irkutskenergo.ru

Кудряшов Александр Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теплоэнергетики,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kan@istu.irk.ru

Коваль Татьяна Валерьевна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры теплоэнергетики,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: kovaltv@istu.irk.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.03.2021; одобрена после рецензирования 02.04.2021; принята к публикации 29.04.2021.

Alexander N. Kudryashov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kan@istu.irk.ru

Tatiana V. Koval,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: kovaltv@istu.edu

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 01.03.2021; approved after reviewing 02.04.2021; accepted for publication 29.04.2021.