

УДК 662.613.12.003

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ. ЧАСТЬ 2

Подгородецкий Г.С., к.т.н., директор научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (podgs@misiss.ru)

Горбунов В.Б., к.т.н., зам. директора научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (vbg1953@mail.ru)

Агапов Е.А., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (ageger@yandex.ru)

Ерохов Т.В., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (timofeyerokhov@gmail.com)

Козлова О.Н., инженер 1-й категории научно-образовательного центра

«Инновационные металлургические технологии» (o_kozlova1@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Для существующих и уже строящихся угольных ТЭЦ известные методы утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) могут быть востребованы при учете всех возникающих новых экологических и экономических рисков, но для нового электрогенерирующего источника при выборе технологии сжигания угля необходимо более существенно повышать значимость экологической составляющей проекта. Считается, что наиболее перспективными технологиями сжигания угля, повышающими экологическую безопасность именно методом сжигания, являются технологии на основе циркулирующего кипящего слоя. Они позволяют существенно снизить выбросы оксидов серы и азота за котлом, но решение проблемы золошлаковых отходов остается на прежнем уровне. Проблему утилизации ЗШО при реализации новых энергетических проектов или при замене выбывающих мощностей угольной генерации предлагается решить заменой сжигания угля в потоке или кипящем слое на сжигание твердого топлива в барботируемом шлаковом расплаве. Даны описания и схемы данных методов. Представлено сравнение основных качественных технических и экологических показателей технологий пылеугольного сжигания и сжигания в шлаковом расплаве. Развитие угольной генерации предполагается по двум основным направлениям: сжигание угля с повышением параметров пара и газогенерация с комбинированным циклом электрогенерации: паровым и газовым, основанным на газификации твердых топлив. Эти направления позволяют увеличить электрический КПД паросиловых установок от 30 – 36 до 44 – 45 % на сверхкритических параметрах пара, а при использовании парогазового комбинированного цикла до 50 – 55 %. Предложена технологическая схема газификации угля в шлаковом расплаве, повышающая электрический КПД установки. Показана экологическая и экономическая эффективность метода газификации твердого топлива и простота производства изделий из шлака методом литья. При этом качество литых шлакокаменных изделий значительно выше аналогичных цементно-песчаных изделий с добавлением золы уноса, а легкость перехода с одной формы литья на другую позволяет быстро реагировать на запросы рынка.

Ключевые слова: уголь, утилизация золошлаковых отходов, газификация, барботаж, шлаковый расплав, шлакокаменное литье.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-557-563

Для существующих и уже строящихся угольных ТЭЦ известные методы утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) [1] могут быть востребованы при учете всех возникающих новых экологических и экономических рисков. Однако для нового генерирующего источника (теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) или конденсационные электростанции (КЭС)) при выборе технологии сжигания угля необходимо более существенно повышать значимость экологической составляющей проекта.

Активно развивающимися технологиями сжигания и/или газогенерации угля, повышающими экологическую безопасность именно методом сжигания, являются технологии на основе циркулирующего кипящего слоя [2, 3]. Они позволяют существенно снизить выб-

росы оксидов серы и азота за котлом [4, 5], но проблема утилизации золошлаковых отходов может быть решена только теми же способами, как и для других традиционных технологий сжигания.

Альтернативой технологии сжигания и/или газогенерации угля с более низкими экологическими рисками как по выбросам вредных веществ, так и по эффективности утилизации ЗШО, являются технологии сжигания угля в барботируемом шлаковом расплаве.

Метод сжигания (газификации) угля в шлаковом расплаве основан на использовании технологии производства цветных металлов и чугуна процесса плавки в жидкой ванне в барботажных печах, разработанных в НИТУ «МИСиС» (процесс Ванюкова, процесс Ро-

мелт) [6, 7]. Технология прошла экспериментальную проверку на барботажных опытно-промышленных и промышленных металлургических агрегатах, для которых режим газификации угля является режимом холодного хода. Основываясь на полученных результатах эксплуатации опытной промышленной установки на Новолипецком металлургическом комбинате, на Несветай ГРЭС в Ростовской области были начаты работы по созданию установки с газификацией угля в шлаковом расплаве. Проект разрабатывался совместно Научно-исследовательским институтом экологических проблем энергетики, НПО «Алгон», НИТУ «МИСиС», Гинцветмет, Стальпроект, ОАО ТКЗ «Красный котельщик» и другими предприятиями [8, 9], но из-за финансовых проблем работы по созданию этой установки были прекращены.

Общий вид установки сжигания угля в шлаковом расплаве, спроектированный для Несветай ГРЭС, представлен на рис. 1 [9]. В терминах энергетического котлостроения данный агрегат представляет собой котел для паросиловой установки (ПСУ) с топкой сжигания твердого топлива широкого фракционного состава в шлаковом расплаве. Процесс сжигания угля или иного твердого топлива происходит следующим образом. В шлаковую ванну, находящуюся в нижней части реактора (топки), через нижние фурмы вдувают кислородсодержащее дутье ниже уровня поверхности шлака. Содержание кислорода в дутье 40 – 100 %. При этом расплав (шлак), находящийся на уровне нижних фурм и выше при температурах 1400 – 1600 °С, переходит в барботируемое газонасыщенное состояние, характеризующееся высокой интенсивностью перемешивания. Сверху в реактор непрерывно загружается уголь и при необходимости флюсы для корректировки состава расплава. После попадания частиц угля в шлак в результате быстрого нагрева из них выделяются летучие компоненты и влага. За счет высокой интенсивности перемешивания происходит замешивание частиц окисленного топлива в объем барботируемой фурменной зоны. Кислород дутья, проходя через шлак, окисляет углерод замешанных в шлаке частиц угля до СО, а зола угля растворяется в шлаке. Далее СО дожигается кислородсодержащим дутьем в области тепловоспринимающих поверхностей котла.

Шлак выводится из подфурменной слабо перемешиваемой зоны в копильник, что позволяет избежать механических потерь не полностью сгоревшего топлива со шлаком, т. е. механический недожог в данном методе сжигания отсутствует.

При определенных технологических условиях оксиды железа в золе угля восстанавливаются с получением металла, по составу близкого к доменному чугуно, который накапливается на подине реактора и выводится через предназначенный для него копильник или периодически через шпур шлакового копильника. Металлы, имеющие температуру парообразования ниже

температуры шлакового расплава, удаляются в газовую фазу, конденсируются при охлаждении и улавливаются в газоочистных установках. Скачиваемый жидкий шлак гранулируется в щебень [10].

В табл. 1 представлено сравнение основных качественных технических и экологических показателей технологий пылеугольного сжигания и сжигания в шлаковом расплаве.

Близкий по техническому решению метод сжигания угля в шлаковом расплаве предлагается немецкими инженерами [11]. Отличительной особенностью данного метода является вдувание угля фракции 0 – 1 мм в слой шлака через нижние фурмы. Следует отметить, что аналогичное решение уже предлагалось для печи Ромелт, прообразом которой является энергетический котел [12].

Дальнейшее развитие угольной генерации предполагается по двум основным направлениям: повышение параметров пара и газогенерация с комбинированным циклом электрогенерации: паровым и газовым, что позволит увеличить электрическое КПД паросиловых установок от 30 – 36 до 44 – 45 % на сверхкритических параметрах пара, а при использовании парогазового комбинированного цикла до 50 – 55 % [13].

В настоящее время технологии газификации угля активно развиваются не только на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, но и на промышленной стадии. В табл. 2 представлен примерный перечень зарубежных заводов, использующих газификацию угля для электрогенерации [14].

В России перспективными технологиями газификации считаются установки с прямоточно-вихревым газогенератором (ЗАО «Компомаш-ТЭК»), горновой газификацией (ОАО «Всероссийский теплотехнический институт» (ВТИ)), газификацией в циркулирующем кипящем слое (ОАО «ВТИ») и газификацией в шлаковом расплаве [15,16].

Однако, за исключением технологии газификации в расплаве, вышеперечисленные технологии по своей сущности соответствуют таким методам газификации, как методы Винклера, Шелл-Копперс, Тексако, Сименс и аналогичные им [17]. С точки зрения удаления золошлаковых отходов, они практически ничем не отличаются от традиционных технологий.

Разработанный в НИТУ «МИСиС» на базе печей барботажного типа политопливный газогенератор [17] более соответствует технологии газификации, в отличие от проекта, выполненного для Несветай ГРЭС, еще более расширяет спектр используемого топлива и решает проблему улавливания ценных компонентов, уходящих в процессе газификации в газовую фазу (рис. 2).

Жидкий шлак при температуре 1400 – 1600 °С сливается в ковш и транспортируется к формам для литейного металла. Аппаратурное оформление участка литейного металла достаточно простое (рис. 3). Печь кристаллизации

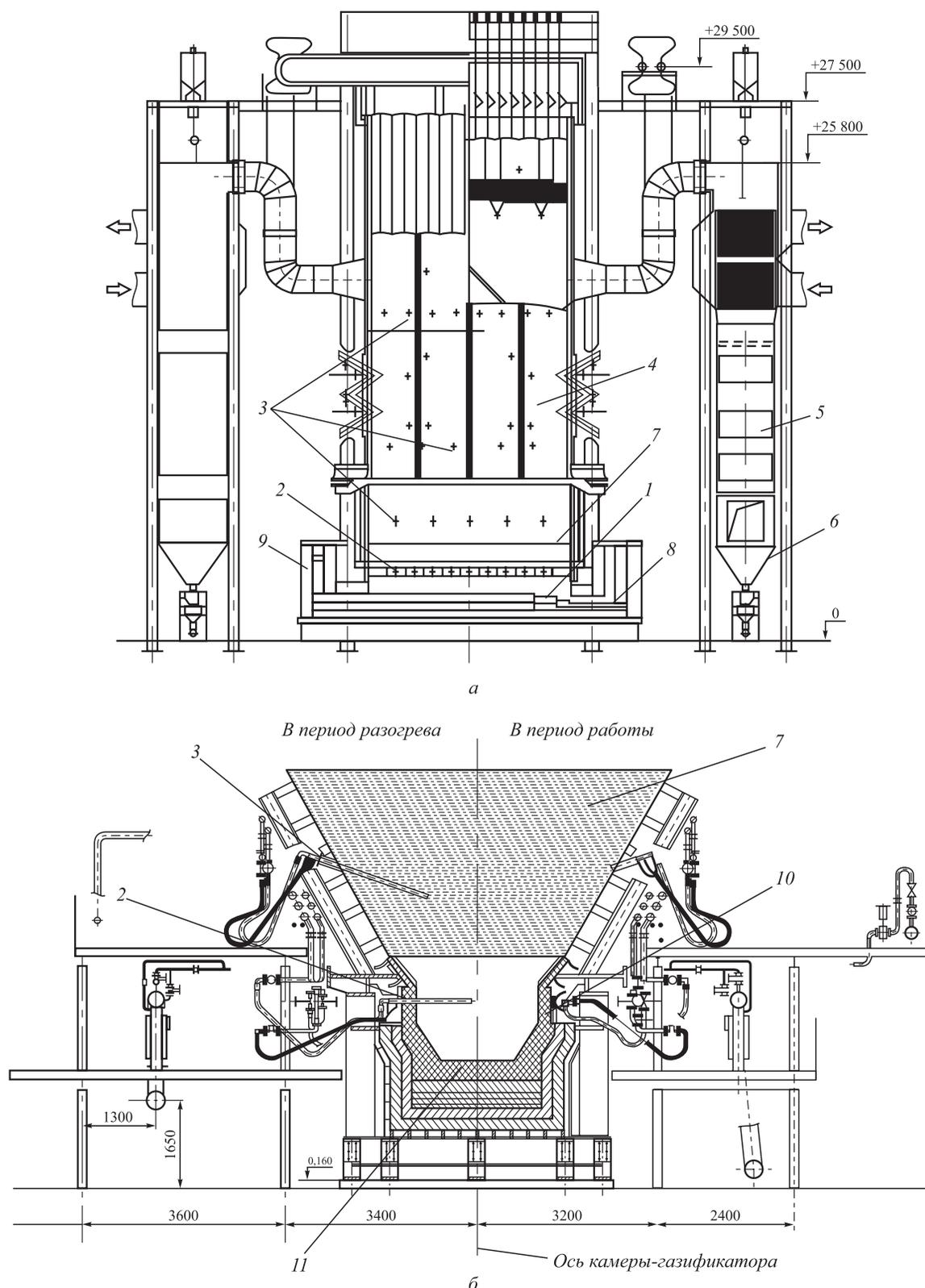


Рис. 1. Общий вид установки (а) и камера сжигания угля (б) в шлаковом расплаве [9]:

1 – камера-газификатор; 2 – нижние фурмы для барботажу расплава; 3 – фурмы дожига; 4 – радиационная часть котла; 5 – конвективная часть котла; 6 – пылесборник; 7 – экономайзер; 8 – летка выпуска металлического расплава; 9 – летка выпуска шлакового расплава; 10 – водоохлаждаемые элементы газификатора; 11 – футеровка

Fig. 1. General view of the installation (a) and the chamber (b) for coal burning in the slag melt:

1 – gasification chamber; 2 – bottom tuyeres for melt bubbling; 3 – afterburn tuyeres; 4 – radiation part of the boiler; 5 – convective part of the boiler; 6 – dust collector; 7 – economizer; 8 – release tap-hole of metal melt; 9 – tap-hole of melt slag; 10 – water-cooled elements of the gasifier; 11 – lining

Таблица 1

Сравнение основных качественных технических и экологических показателей технологий пылеугольного сжигания и сжигания в шлаковом расплаве

Table 1. Comparison of the main qualitative technical and environmental indicators of pulverized coal combustion and incineration technologies in slag melt

Показатель	Пыле-угольное сжигание	Сжигание в шлаковом расплаве
Относительные капитальные затраты, %	100	90 – 94
Маневренность котла по нагрузке, %	60 – 100	30 – 100
Маневренность котла по топливу	Низкая	Высокая
Требования к фракционному составу топлива	Есть	Нет
Механический недожег, %	5 – 20	–
Потери тепла с отходящими газами, %	5 – 15	3 – 8
Содержание NO _x за котлом, мг/м ³	200 – 300	60 – 100
Необходимость строительства золошлакового отвала	Есть	Нет
Возможность получения побочных продуктов	Отдельное производство	Металл, гранулированный шлак

Таблица 2

Краткий сравнительный анализ внедрения проектов основных «чистых» угольных технологий в России и в мире [14]

Table 2. Brief comparative analysis of the projects implementation of the main “clean” coal technologies in Russia and in the world [14]

Установка	Количество	
	в мире	в России
ЦКС	>1000	Первый энергоблок 330 МВт на Новочеркасской ГРЭС введен в эксплуатацию в 2015 г.
ССКП	~150	1 (опытная установка 0,4 МВт ВТИ)
ПГУ с газификацией угля (для производства электроэнергии)	~15	0

и отжига применяется только для определенного вида изделий.

Литые каменные изделия обладают пористостью не выше 2 %, в них поры замкнутые и поэтому материал практически не поглощает воду, изделия обладают высокой морозостойкостью и большой прочностью: при сжатии до 400 МПа, при изгибе до 65 МПа и малой истираемостью. Для сравнения прочность цементно-

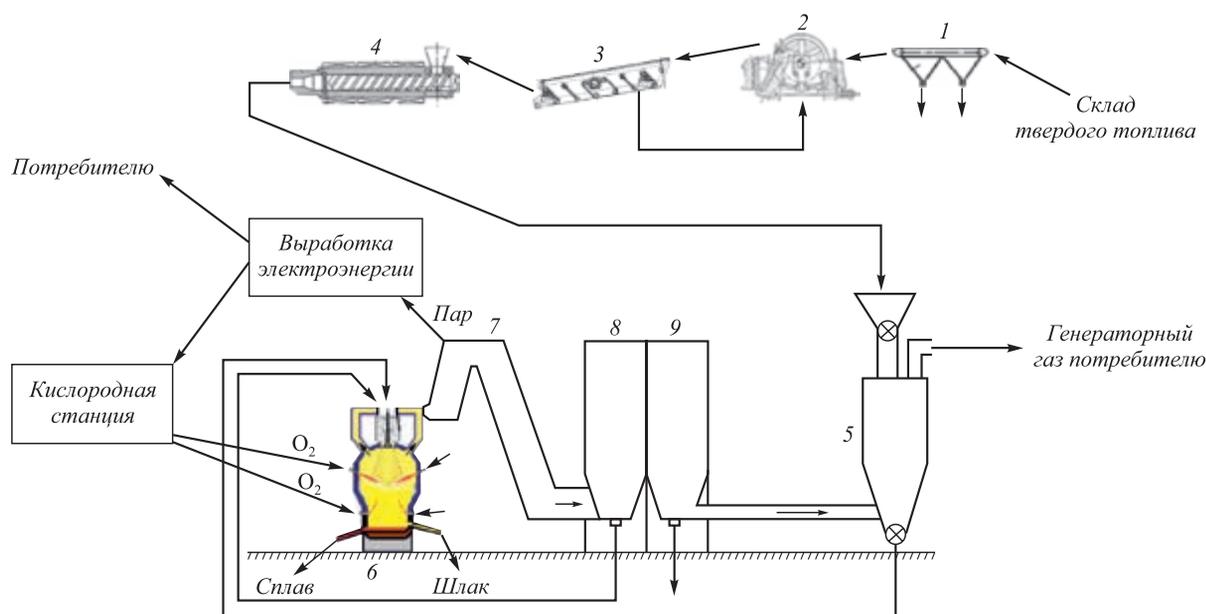


Рис. 2. Технологическая схема политопливного газогенератора:

1 – вакуум-фильтры; 2 – дробилка; 3 – грохот; 4 – экструдер; 5 – сушилка для брикетов; 6 – газификатор с барботируемым шлаковым расплавом; 7 – котел утилизатор; 8, 9 – система газоочистки

Fig. 2. Flow chart of polyfuel gas generator

1 – vacuum filters; 2 – crusher; 3 – screen; 4 – extruder; 5 – dryer for briquettes; 6 – gasifier with bubbling slag melt; 7 – waste heat boiler; 8, 9 – gas cleaning system

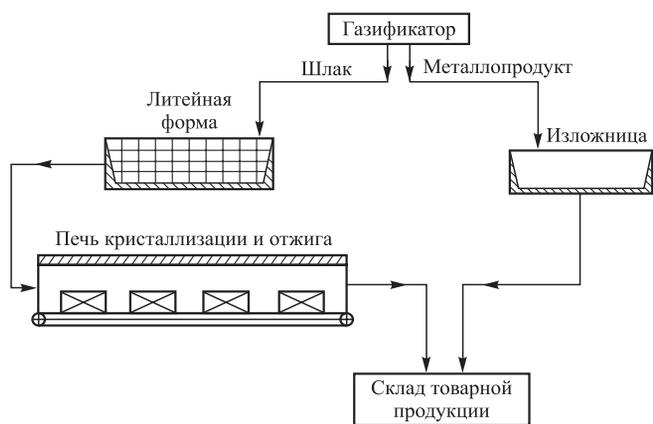


Рис. 3. Участок каменного литья

Fig. 3. Stone casting site

песчаных изделий, где применяется зола уноса, не превышает 44 МПа [18].

Изделиям из каменного литья свойственны высокие диэлектрические показатели, термостойкость и химическая стойкость. Некоторые виды изделий представлены на рис. 4. Легкость перехода с одной формы литья на другую позволяет быстро реагировать на запросы рынка.

Операционную экономическую привлекательность подобного проекта можно очень грубо оценить по двум составляющим дополнительного денежного потока: денежный поток от продаж изделий и отсутствие платы за хранение отходов третьего класса опасности.

Для примера проведем расчет для строящейся угольной ТЭЦ в г. Советская Гавань Хабаровского края электрической мощностью 126 МВт в составе трех паровых котлов Е-210-13, 8-560, работающих на ка-

менном угле Ургальского месторождения зольностью 33,6 % на сухую массу. Срок ввода – 2018 г. Выход золы – 30,77 т/ч, шлака – 0,54 т/ч, при годовом времени работы 5000 ч годовой выход золы – 153 850 т, шлака – 2700 т [19]. Ставка платы за 1 т загрязняющих веществ в 2018 г.: отходы III класса опасности (умеренно опасные – золы уноса) – 1327 руб, отходы IV класса опасности (малоопасные – шлаковые отходы) – 663,2 руб [20]. Плата за хранение отходов составит 205 949 590 руб.

Минимальный выход шлака в год – не ниже выхода ЗШО – 156 550 т, выход годного продукта 150 288 т. Выберем изделие с наименьшей ценой за тонну – фундаментные бетонные блоки, минимальная цена которых составляет 1800 руб/т. Стоимость продаж получается 270 518 400 руб. Итого дополнительный денежный поток составит минимум 476 млн руб/год.

Таким образом, выбор технологии сжигания и газификации углей в шлаковом расплаве существенно повышает экологичность и экономичность производства тепла и электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., Агапов Е.А. и др. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 439 – 446.
2. Родионов В.Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. – М.: ЭНАС, 2010. – 352 с.
3. Рябов Г.А. Перспективы освоения технологии сжигания угля в циркулирующем кипящем слое на российских угольных ТЭС: Междунар. науч.-практич. конф. «УгольЭко-2016». 27–28 сентября 2016 г. Москва, НИУ «МЭИ». [Электронный ресурс] URL: <http://coaleco.ru/wp-content/uploads/2016/10/3-Ryabov-VI-Coaleco2016.pdf>. (дата обращения 16.04. 2018).
4. Рябов Г.А., Толчинский Е.Н., Надыров И.И. и др. Применение котлов с циркулирующим кипящим слоем для замены уста-



Циклоны



Трубы



Желоба



Плитка



Плитка



Каменная вата

Рис. 4. Виды изделий из каменного литья

Fig. 4. Types of products made of stone casting

- ревших пылеугольных котлов // Теплоэнергетика. 2000. № 8. С. 14 – 19.
5. Goral A.D. Lagisza 460 MWe Supercritical CFB. Design, start-up and initial operation experience. Foster Wheeler Energia Polska. Presentation. Coal-Gen Europe. Septetember 1 – 4, 2009. Katowice, Poland, 2009.
 6. Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д. Плавка в жидкой ванне. – М.: Metallurgiya, 1988. – 208 с.
 7. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Изд. дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.
 8. Дьяков А.Ф., Мадоян А.А., Доброхотов В.И. и др. Новые подходы к технологии использования твердого топлива в электроэнергетике // Теплоэнергетика. 1998. № 2. С. 14 – 19.
 9. Баласанов А.В., Лехерзак В.Е., Роменец В.А. Газификация угля в шлаковом расплаве. – М.: Институт Стальпроект, 2008. – 288 с.
 10. Комков А.А., Баласанов А.В., Дитятковский Л.И. и др. Пирометаллургическая технология как эффективный способ утилизации золошлаковых отходов и безотходного сжигания различных типов твердого топлива // Уголь. 2013. № 9 (1050). С. 65 – 70.
 11. Гарбер В., Сераг М. Энергетический котел с сжиганием угля в барботируемом шлаковом расплаве: Междунар. науч.-практич. конф. «УгольЭко-2016». 27 – 28 сентября 2016 г. Москва, НИУ «МЭИ». [Электронный ресурс] URL: <http://coaleco.ru/news/coaleco-2016-presentations/> (дата обращения 16.04. 2018).
 12. Валавин В.С., Роменец В.А., Похвиснев Ю.В. и др. Технические и проектные решения по вдуванию пылеугольного топлива (ПУТ) в шлаковую ванну печи Ромелт // Тр. Шестой Междунар. науч.-практич. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология». – М.: МИСиС, 2012. С. 77 – 85.
 13. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3 – 13.
 14. Славинская Л. Газификация угля: мировые тенденции // Нефтегазовая вертикаль. 2011. № 18. С. 13 – 16.
 15. Инновационные проекты в российской энергетике. Фонд «Энергия без границ» [Электронный ресурс] URL: http://energy-fund.ru/upload/docs/Фонд_Энергия_Буклет.pdf. (дата обращения 04.04. 2018).
 16. Кожуховский И.С., Алешинский Р.Е., Говсиевич Е.Р. Проблемы и перспективы угольной генерации в России // Уголь. 2016. № 2. С. 4 – 15.
 17. Подгородецкий Г.С., Юсфин Ю.С., Сажин А.Ю. и др. Современные тенденции развития технологии производства генераторных газов из различных видов твердого топлива. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 6. С. 393 – 401.
 18. Гусев К.П., Ларичкин В.В., Ларичкина Н.И. Перспективы использования золошлаковых отходов теплоэнергетики Сибири в производстве тротуарного камня // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1. С. 2058 – 2061.
 19. Строительство ТЭЦ в г. Советская Гавань Хабаровского края. Проектная документация. Раздел 12. Подраздел 3. «Оценка воздействия объекта на окружающую среду». Институт «СибВНИИЭнергопром». Иркутский филиал. 2012 г.
 20. Постановление Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах».

Поступила 15 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 7, PP. 557–563.

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF UTILIZATION OF ASH AND SLAG WASTE OF TPP (THERMAL POWER PLANT). PART 2

G.S. Podgorodetskii, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov, T.V. Erokhov, O.N. Kozlova

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

Abstract. For existing and already constructed coal TPP plants, known methods of utilization of fly ash and slag wastes (FASW) may be in demand when all emerging environmental and economic risks are taken into account. But for the new power generating source when choosing coal combustion technology, it is necessary to increase the significance of the environmental component of the project more essentially. It is known that the most promising technologies for coal combustion, which increase environmental safety exactly by burning, are technologies based on a circulating fluidized bed. These technologies can significantly reduce sulfur and nitrogen oxide emissions behind the boiler, but the solution to the problem of fly ash and slag waste remains at the same level. It is proposed to solve the problem of FASW utilization during the implementation of new energy projects or when replacing the decommissioning capacities of coal generation by replacing the method of coal combustion in a stream or fluidized bed with methods of burning solid fuel in a bubbling slag melt. The descriptions and schemes of these methods are given. The comparison of the main qualitative technical and ecological parameters of pulverized coal combustion and technologies of coal combustion in slag melt is presented. The development of coal generation is expected in two main areas: coal combustion with increasing steam parameters and gas generation with a combined cycle of electricity generation: steam and gas, based on the gasification of solid fuels. These directions will allow achieving electric efficiency of steam-power plants from 30 – 36 %, up to 44 – 45 %

on supercritical steam parameters, and using a combined steam-gas cycle up to 50 – 55 %. A technological scheme of gasification of coal in a slag melt is proposed, which increases the electrical efficiency of the installation. The ecological and economic efficiency of the gasification method for solid fuel and the simplicity of the production of slag products by casting are shown. The quality of cast slagstone products is much higher than similar cement-sand products with the addition of fly ash, and the ease of transition from one casting mold to another allows quickly responding to market demands.

Keywords: coal, utilization of ash and slag wastes, gasification, bubbling, slag melt, slagstone casting.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-7-557-563

REFERENCES

1. Podgorodetskii G.S., Gorbunov V.B., Agapov E.A., Erokhov T.V., Kozlova O.N. Challenges and opportunities utilization of ash and slag waste of TPP (thermal power plant). Part 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 6, pp. 439–446. (In Russ.).
2. Rodionov V.G. *Energetika: problemy nastoyashchego i vozmozhnosti budushchego* [Electric power industry: challenges of the present and opportunities for the future]. Moscow: ENAS, 2010, 352 p. (In Russ.).
3. Ryabov G.A. Prospects for mastering the technology of coal combustion in the circulating fluidized bed at Russian coal TPP. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Ugol’Eko-2016” TES 27–28 sentyabrya 2016 goda, MEL, g. Moskva* [Int. Sci. and Pract. Conf. “Ugol’Eco-2016” TPP, September 27–28, 2016, MPEI, Moscow]. Electronic resource. Available at

- URL: <http://coaleco.ru/wp-content/uploads/2016/10/3-Ryabov-VTI-Coaleco2016.pdf>. (Accessed 16.04. 2018). (In Russ.).
4. Ryabov G.A., Tolchinskii E.N., Nadyrov I.I., Folomeev O.M., Trukhachev S.N., Shaposhnik D.A. Using boilers with a circulating fluidized bed to replace old pulverized-coal boilers. *Thermal Engineering*. 2000, vol. 48, no. 8, pp. 679–686.
 5. Goral A.D. Lagisza 460 MWe Supercritical CFB. Design, start-up and initial operation experience. Foster Wheeler Energia Polska. Presentation. *Coal-Gen Europe. Septetember 1–4, 2009*. Katowice, Poland, 2009.
 6. Vanyukov A.B., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in liquid bath]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 208 p. (In Russ.).
 7. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Roments V.A. ed. Moscow: MISiS, ID Ruda i metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
 8. D'yakov A.F., Madoyan A.A., Dobrokhotov V.I., Levchenko G.I., Kushnarev F.A., Khristich L.M. New approaches to using solid fuel in the electric power industry. *Thermal Engineering*. 1998, vol. 45, no. 2, pp. 103–108.
 9. Balasanov A.V., Lekherzak V.E., Romenets V.A. *Gazifikatsiya uglya v shlakovom rasplave: Monografiya* [Coal gasification in slag melt: Monograph]. Moscow: Institut Stal'proekt, 2008, 288 p. (In Russ.).
 10. Komkov A.A., Balasanov A.V., Dityatovskii L.I. etc. Pyrometallurgical technology as an effective method of ash and slag waste disposal and waste-free combustion of various types of solid fuel. *Ugol'*. 2013, no. 9 (1050), pp. 65–70. (In Russ.).
 11. Garber V., Serat M. Energy boiler with coal combustion in a bubbling slag melt. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ugol'Eko-2016"*, 27 – 28 sentyabrya 2016 goda, MEI, g. Moskva [Int. Sci. and Pract. Conf. "Ugol'Eco-2016" TPP, September 27-28, 2016, MPEI, Moscow]. Electronic resource. Available at URL: <http://coaleco.ru/news/coaleco-2016-presentations/> (Accessed 16.04. 2018). (In Russ.).
 12. Valavin V.S., Romenets V.A., Pokhvisnev Yu.V., Makeev S.A. etc. Technical and design solutions for the injection of pulverized coal (PUT) into the slag bath of the Romelt furnace. In: *Trudy shestoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya"* [Proceedings of the Sixth Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy Saving Technologies in Industry. Furnace aggregates. Ecology"]. Moscow: MISiS, 2012, pp. 77–85. (In Russ.).
 13. Tumanovskii A.G. Prospects for the development of coal-steam plants in Russia. *Teplenergetika*. 2017, vol. 64, no. 6, pp. 399–407.
 14. Slavinskaya L. Coal gasification: world trends. *Neftegazovaya veritikal'*. 2011, no. 18, pp. 13–16. (In Russ.).
 15. *Innovatsionnye proekty v rossiiskoi energetike. Fond "Energiya bez granits"* [Innovative projects in the Russian energy sector. Foundation "Energy without Borders"]. Electronic resource. Available at URL: http://energy-fund.ru/upload/docs/Fond_EHnergiya_Buklet.pdf. (Accessed 04.04. 2018). (In Russ.).
 16. Kozhukhovskii I.S., Aleshinskii R.E., Govsievich E.R. Challenges and prospects of coal generation in Russia. *Ugol'*. 2016, no. 2, pp. 4–15. (In Russ.).
 17. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Manufacturing trends of generator gases from different types of solid fuel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 393–401. (In Russ.).
 18. Gusev K.P., Larichkin V.V., Larichkina N.I. Prospects of using the ashes waste from Siberia power system in manufacture the paving tile. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2011, vol. 13, no. 1, pp. 2058–2061. (In Russ.).
 19. *Stroitel'stvo TETs v g. Sovetskaya Gavan' Khabarovskogo kraja. Proektnaya dokumentatsiya. Razdel 12. Podrazdel 3: Otsenka vozdeistviya ob'ekta na okruzhayushchuyu sredu* [Construction of a TPP plant in Sovetskaya Gavan, Khabarovsk Territory. Project documentation. Section 12. Subsection 3. Assessment of the impact of the facility on the environment]. Irkutsk: SibVNIPIenergoprom. Irkutskii filial, 2012. (In Russ.).
 20. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13 sentyabrya 2016 g. № 913 "O stavkakh platy za negativnoe vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu i dopolnitel'nykh koeffitsientakh"* [Resolution of the Government of the Russian Federation of September 13, 2016 No. 913 "On rates of payment for the negative impact on environment and additional coefficients"].

Information about the authors:

G.S. Podgorodetskii, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center "Innovative Metallurgical Technologies" (podgs@misis.ru)

V.B. Gorbunov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Scientific and Educational Center "Innovative Metallurgical Technologies" (vbg1953@mail.ru)

E.A. Agapov, Engineer of the Scientific and Educational Center "Innovative Metallurgical Technologies" (ageger@yandex.ru)

T.V. Erokhov, Engineer of the Scientific and Educational Center "Innovative Metallurgical Technologies" (timofeyerokhov@gmail.com)

O.N. Kozlova, Engineer of the Scientific and Educational Center "Innovative Metallurgical Technologies" (o_kozlova1@mail.ru)

Received May 15, 2018