

УДК 621.793:691.224.1:66.041.64

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ФОРМОВАННЫХ РУДНО-УГОЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ

Сторожев Ю.И., к.т.н., доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики (albino@krasmail.ru)

Подборский Л.Н., к.т.н., доцент кафедры тепловых электрических станций

Худяков И.А., студент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики

Сибирский федеральный университет
(660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79)

Аннотация. Представлены результаты расчетов технологических параметров процесса металлизации формованных рудно-угольных материалов в кольцевой печи с вращающимся подом, отапливаемой генераторным газом. Усовершенствована система утилизации тепла отходящих из кольцевой печи дымовых газов путем введения дополнительных контуров после паровой турбины, позволяющих вырабатывать тепловую и электрическую энергию. Изменена схема подвода теплоносителя к рекуператорам для подогрева воздуха и генераторного газа и к решетке для подогрева окатышей или брикетов с целью обеспечения их более высоких температур. Рассчитан ориентировочный экономический эффект от технических преобразований энерготехнологической установки металлизации рудно-угольных материалов.

Ключевые слова: металлизация, формованные материалы, кольцевая печь, утилизация тепла, паровая турбина, тепловой контур.

На сегодняшний день в черной металлургии имеются различные технологии, обеспечивающие производство металлизированного продукта в печах: вращающихся (SL-RN), шахтных (Midrex), кольцевых с вращающимся подом (ITmk3). Одним из преимуществ металлизации рудно-угольных материалов в кольцевой печи является возможность отделения гранул чугуна от основной массы шлака [1], что снижает затраты на последующую переработку чугуна.

На рис. 1 представлена схема процесса металлизации рудно-угольных материалов в печи с вращающимся подом [2].

Окатыши или брикеты из рудно-угольных материалов поступают в печь через загрузочное устройство. В горелки подаются природный газ и подогретый воздух. Подогрев воздуха необходим для достижения температуры газового потока в зоне восстановления печи

около 1500 – 1550 °С. Тепловая энергия, выделяющаяся из факела при сгорании топлива, нагревает окатыши (брикеты) до 1350 – 1450 °С. При высокой температуре железо восстанавливается, науглероживается и подплавляется. Науглероживание железа приводит к снижению температуры его плавления. В процессе восстановления из окатышей (брикетов) выделяется газ, который дожигается, реагируя с поступающим в печь кислородом воздуха. При этом достигается температура плавления окатышей (брикетов) и обеспечивается возможность отделения чугуна от жидкого шлака.

Одно из требований технологии ITmk3 (Ironmaking Technology mark 3) – использование железорудных концентратов с содержанием $Fe_{\text{общ}} > 60\%$ и обеспечение избыточного углерода в окатышах после полного восстановления в диапазоне 2,5 – 4,5 %. При содержании остаточного углерода менее 1,5 % температура

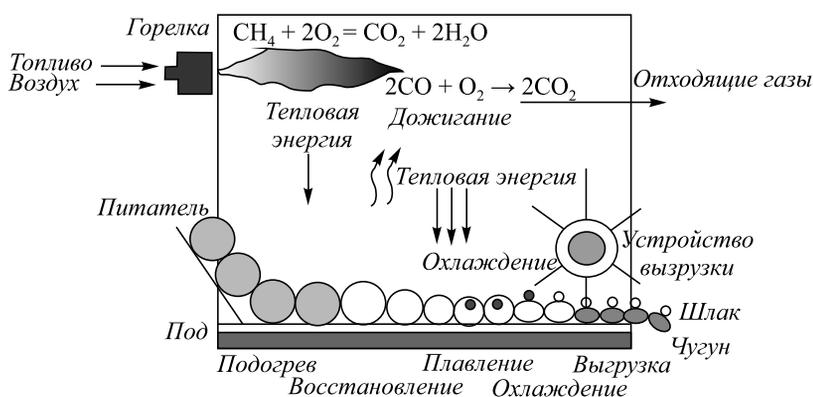


Рис. 1. Схема металлизации рудно-угольных материалов в печи с вращающимся подом

Fig. 1. Scheme of metallization of ore-coal materials in circular furnace

плавления железа существенно не снизится из-за недостатка углерода для науглероживания, и температура в печи в этом случае должна быть максимальной. Технологией определены гарантируемые показатели готовой продукции – гранулированного чугуна, содержащего > 96 % Fe, 2,0 – 4,0 % C, 0,2 % Si, 0,05 % P, 0,04 – 0,10 % S.

Этот процесс заложен в основу энерготехнологической установки для металлизации формованных рудно-угольных материалов. Такая технология освоена на заводе Messabi Nuggets (Миннесота, США) с использованием в качестве топлива угля и природного газа [1, 2]. Делаются попытки ее реализации в России с использованием в качестве топлива генераторного газа [3]; интерес к этой технологии в плане лабораторных исследований проявлен также в работах [4, 5].

К недостаткам технологической схемы [3] с применением низкокалорийного газа следует отнести неполную утилизацию теплоты дымовых газов, отходящих из печи, и отсутствие системы охлаждения металлизированного продукта до поступления его в магнитный сепаратор. Кроме того, в этой схеме невозможно достижение требуемой температуры нагрева воздуха до 400 – 450 °С, так как для его нагрева в рекуператоре используются дымовые газы, уходящие из котла-утилизатора, температура которых не превышает 300 °С.

Целью настоящей работы является улучшение технологической схемы [3], устранение ее недостатков. На рис. 2 представлена схема модернизированной энерготехнологической установки для металлизации формованных рудно-угольных материалов.

Металлизации подвергаются формованные рудно-угольные брикеты с диаметром и высотой 0,024 м, массой 23 г. Основным элементом энерготехнологической установки является кольцевая печь с вращающимся подом с размерами: длина по периметру 57,4 м, ширина пода 2,69 м, высота рабочего пространства 1,5 м. Проектный годовой расход рудно-угольных брикетов составляет 210 240 т.

Для изготовления брикетов использован агломерационный железорудный концентрат Коршуновского ГОКа состава: 62,2 % Fe, 3,95 % SiO₂, 1,9 % CaO, 0,13 % MnO, 2,65 % Al₂O₃, 0,25 % TiO₂, < 4,0 % MgO, 0,02 % S, ≤ 0,16 % P, от 2,5 до 10,5 % H₂O, 1,65 % ППП. В качестве восстановителя применен Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения с показателями 77,3 % C^r, 1,2 % S^r, 16,5 % A^c, 11,5 % H₂O^p, 13,7 % O^r, 5,6 % H^r, 1,1 % N^r, 45,6 % V^r.

Низшая теплота сгорания угля составляет 23 028,5 кДж/кг. Температура плавления золы 1310 – 1390 °С. Химический состав золы следующий: 67,1 % SiO₂, 19,2 % Al₂O₃, 2,5 % Fe₂O₃, 2,2 % CaO,

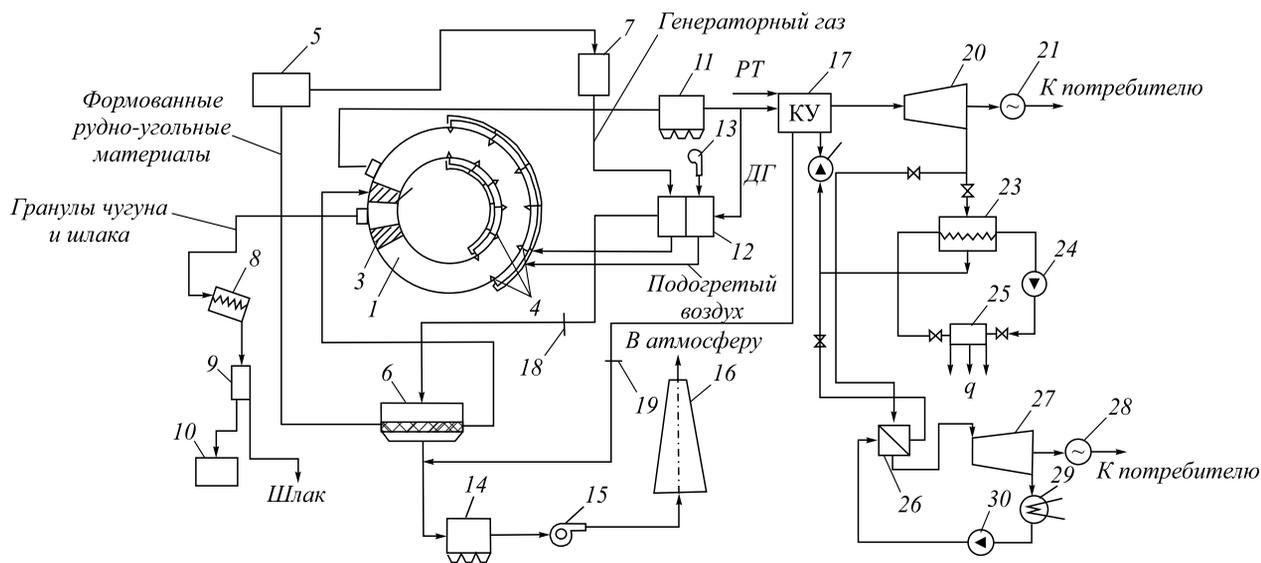


Рис. 2. Схема энерготехнологической установки для металлизации формованных рудно-угольных материалов:

1 – кольцевая печь; 2 – загрузочное устройство; 3 – разгрузочное устройство; 4 – газовые горелки; 5 – система подготовки формованных рудно-угольных материалов; 6 – конвейерная решетка; 7 – угольный газификатор; 8 – вращающийся барабанный холодильник; 9 – магнитный сепаратор; 10 – склад; 11, 14 – газоочистные установки; 12 – рекуператоры для подогрева воздуха и газа; 13 – дутьевой вентилятор; 15 – дымосос; 16 – дымовая труба; 17 – котел-утилизатор с камерой дожигания; 18, 19 – шибера; 20 – турбина; 21, 28 – электрогенераторы; 22, 24, 30 – питательные насосы; 23 – конденсатор-теплообменник; 25 – тепловой потребитель; 26 и 27 – испаритель и турбина низкокипящей жидкости; 29 – конденсатор низкокипящей жидкости; PT – резервное топливо; ДГ – дымовые газы

Fig. 2. Scheme of industrial power installation for metallization of molded ore-coal materials:

1 – circular furnace; 2 – charging device; 3 – discharging devices; 4 – gas burners; 5 – molded ore-coal material preparation system; 6 – conveyor lattice; 7 – coal gasifier; 8 – rotary drum cooler; 9 – magnet separator; 10 – stock; 11, 14 – gas purification installation; 12 – air and gas heating recuperators; 13 – blower fan; 15 – fume exhaust; 16 – chimney; 17 – firing heat recovery boiler; 18, 19 – flue dumpers; 20 – turbine; 21, 28 – power generators; 22, 24, 30 – feed pumps; 23 – heat exchange condenser; 25 – heat consumer; 26 and 27 – evaporator and low boiling liquid turbine; 29 – condenser of low-boiling liquid; PT – reserve fuel; ДГ – chimney gases

1,6 % MgO, 0,7 % K₂O, 0,1 % TiO₂, 0,1 % Na₂O, 4,4 % SO₃, 0,01 % MnO₂. Для отопления печи в проекте использован паровоздушный генераторный газ из каменного угля состава 5,0 % CO₂, 0,2 % O₂, 27,0 % CO, 13,0 % H₂, 2,7 % CH₄, 0,3 % C₂H₄, 51,8 % N₂. Теплота сгорания генераторного газа равна 5976 кДж/м³.

Материалы и дымовые газы в печи движутся по противоточной схеме, температура дымовых газов на выходе из печи задана равной 1000 – 1050 °С, температура предварительно подогретых брикетов на входе в печь принята равной 250 °С, а максимальная температура газов в печи 1550 °С. Температура металлizedанной шихты, выгружаемой из печи, принята равной 1000 – 1100 °С. Ниже приведены значения необходимой температуры газов (факела) T_{ϕ} в печи, которая достигается при подогреве воздуха ($T_{в}$) и генераторного газа ($T_{гр}$) и коэффициенте расхода воздуха 1,05:

$T_{в}$, °С	350	350	400	400	450	450
$T_{гр}$, °С	100	200	100	200	100	200
T_{ϕ} , °С	1434	1510	1451	1527	1468	1558

По заданному температурному режиму рассчитано время пребывания материала в каждой из зон. Расчет времени нагрева выполняли при граничных условиях третьего рода при усредненных в зонах температурах газа по методике расчета времени нагрева металла в методической печи [6]. Ряд теплофизических параметров рудных, угольных и металлizedанных материалов заимствован из работы [7]. Общее время пребывания материала в печи исходя из условий теплообмена составило около 30 мин. По этим данным построен график распределения температур газа и материала по длине L печи во времени τ (рис. 3). Для обеспечения указанной годовой производительности кольцевой печи по исходной продукции необходима загрузка брикетов по высоте в два слоя.

При указанных температурах на выходе из печи будут получены гранулы чугуна, покрытые шлаковой оболочкой. После охлаждения продуктов металлizationи должна проводиться их механическая обработка путем обжигания с целью отделения шлака от гранул чугуна.

На основе принятых и рассчитанных конструктивных и технологических параметров составлены материальный и тепловой балансы кольцевой печи (табл. 1 и 2). Для упрощения расчетов принято, что коксовая подсыпка, закрытая слоем брикетов, не горит и не уносится дымовыми газами. Количество газов, выделяющихся из брикетов, находили по результатам лабораторных исследований изменения массы брикетов [8] и состава газа [5] в процессе их нагрева и восстановления. Теплопотребление рудно-угольных брикетов при их металлizationи оценивали по данным работы [9].

Значимыми расходными статьями теплового баланса являются потери тепла с уходящими дымовыми газами, образующимися при горении генераторного газа и газа, выделяющегося из брикетов в процессе восстановления. Эти теплопотери составляют около 48 % от общего количества тепловых затрат.

Утилизация тепла дымовых газов из кольцевой печи обеспечена следующим образом. Часть (64 %) этих газов направляется в керамический рекуператор для утилизации их тепла при нагревании подаваемого в печь воздуха до требуемой температуры 400 – 450 °С. Отработанные дымовые газы из рекуператора керамического поступают в трубчатый для подогрева генераторного газа до 150 – 200 °С. Другая часть (36 %) дымовых газов направляется в котел-утилизатор для утилизации их тепла при производстве пара, подаваемого на турбину с теплофикационным противодавлением. Механическая энергия турбины преобразуется в электрическую в электрогенераторе, а тепло отработавшего пара – в тепловую энергию, отводимую из теплообменника.

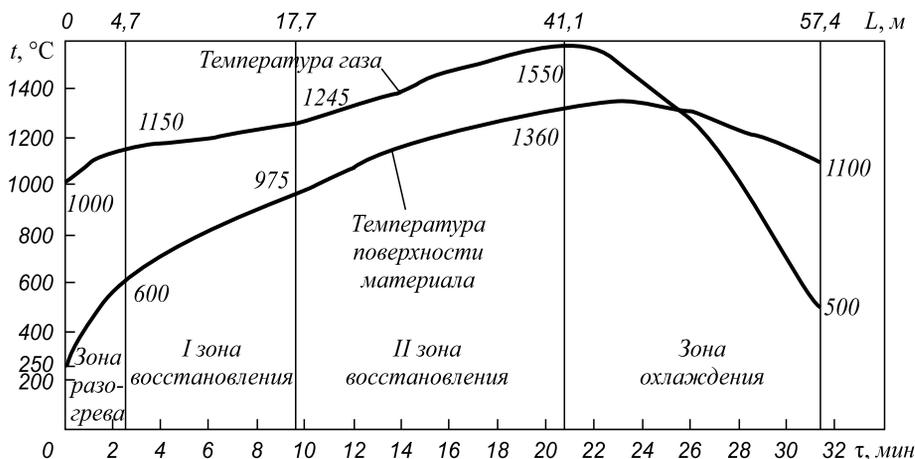


Рис. 3. Распределение температуры газа и материала по длине печи во времени

Fig. 3. Heat and material distribution along the furnace length in time

Т а б л и ц а 1

Результаты расчетов материального баланса

Приход	кг/ч	%	Расход	кг/ч	%
Брикеты, загружаемые в печь	24 000,0	27,01	Металлизированная шихта на выходе из печи	14 725,0	16,58
Коксовая подсыпка, загружаемая в печь	5157,0	5,80	Дымовые газы от сгорания генераторного газа	49 753,4	56,00
Воздух на горение генераторного газа	30 186,0	33,98	Дымовые газы от сгорания газа, выделяющегося из брикетов	19 038,2	21,43
Воздух на горение газа, выделяющегося из брикетов	9878,4	11,12	Коксовая подсыпка	5157,0	5,80
Генераторный газ, подаваемый на горелки	19 620,0	22,09	Пылеунос	167,8	0,19
Итого:	88 841,4	100,00	Итого:	88 841,4	100,00

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов теплового баланса

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
Химическое тепло от горения газа: генераторного	29 880,0	58,49	Теплота на нагрев брикетов	7100,0	14,47
выделяющегося из брикетов	11 413,2	22,34	Теплота, уносимая продуктами сгорания: генераторного газа	17 100,1	34,86
Физическая теплота: генераторного газа	842,5	1,65	выделяющегося из брикетов газа	6298,3	12,84
вносимая подогретым воздухом для горения: генераторного газа	3725,8	7,29	Теплота, затраченная на: процесс восстановления	14 414,3	29,38
выделяющегося из брикетов газа	1280,7	2,50	нагрев коксовой подсыпки	1544,2	3,15
Физическая теплота, вносимая: коксовой подсыпкой	31,5	0,06	Теплота, теряемая теплопроводностью через кладку, зоной разгрузки и водяным охлаждением	2553,5	5,21
брикетами	1883,3	3,68	Теплота пылеуноса	46,6	0,09
Итого:	49 057,0	100,00	Итого:	49 057,0	100,00

Утилизация тепла отработанных дымовых газов рекуператоров происходит на конвейерной решетке при предварительном нагреве рудно-угольных брикетов до 250 – 350 °С перед загрузкой их в печь. Производительность конвейерной решетки площадью 10 м², соответствующая производительности кольцевой печи, обеспечивается при толщине слоя брикетов на решетке 0,10 – 0,15 м при температурах отходящих из рекуператоров дымовых газов 490 – 590 °С. Тепловые расчеты выполнены по методу, изложенному в работе [10]. Теплоемкость брикетов принята по данным [9].

Для обеспечения безопасного режима магнитной сепарации металлизированного продукта после устройства выгрузки из кольцевой печи по методике [11] рассчитан вращающийся барабанный холодильник марки Б 3-30 diam. 3 и длиной 30 м. Барабан холодильника снаружи охлаждается оборотной водой с расходом 300 т/ч.

Температура охлажденного продукта принята равной 100 °С. Конечная температура охлаждающей воды по расчету составила 45 °С при числе оборотов холодильника 3,2 об/мин и уклоне 3°.

Недостатком утилизации тепла с помощью паровых турбин с противодавлением является то, что они могут работать только в отопительный период при наличии тепловой нагрузки. В неотапливаемый период (летом) турбина не сможет работать, следовательно, не сможет работать и вся схема утилизации тепла печи. В результате среднегодовое значение коэффициента использования установленной мощности не превысит 60 – 65 %. Для устранения этого недостатка в рассмотренной схеме используется вторичный низкотемпературный контур, который может работать на фреоне, аммиаке, пентане, бутане и других низкокипящих жидкостях. К выхлопу противодавленческой турбины

подключается контур, включающий испаритель низкокипящей жидкости и турбину, работающую на образовавшемся паре.

В отопительный период паровая турбина с противодавлением работает на сетевой подогреватель, вырабатывая номинальную электрическую мощность плюс тепловую мощность, отдаваемую теплофикационной воде в подогревателе. В летний период при отсутствии отопительной нагрузки сетевой подогреватель отключается и отработавший водяной пар направляется в испаритель низкокипящей жидкости вторичного контура. В испарителе образуется перегретый пар, который поступает в турбину вторичного контура, вырабатывая дополнительную электроэнергию. Отработавший в турбине пар, пройдя через конденсатор, возвращается в испаритель, замыкая вторичный контур. В результате зимой турбина с противодавлением вырабатывает свою номинальную электрическую мощность плюс тепловую мощность на отопление объектов предприятия, а летом суммарная электрическая мощность установки возрастает на величину мощности второй турбины низкокипящего контура. Проектирование и производство таких турбин освоено, первые образцы уже работают на некоторых объектах [12]. В качестве сетевых подогревателей можно использовать малогабаритные теплообменники пластинчатого типа.

Расчетный расход проходящих через котел-утилизатор дымовых газов, разбавленных воздухом до нормативной температуры, составляет 31 900 м³/ч, температура их на входе 600 °С, на выходе – 230 °С. Расчетная производительность котла, выполненная по методике [6], составляет 6,5 т/ч, давление пара 130 МПа, температура 250 °С. Этим параметрам соответствует котел-утилизатор серии КУ-30.

Электрическая мощность паровой турбины составляет 480 кВт. Этой мощности и параметрам пара соответствует малогабаритная турбина серии Р-0,5-1,4 ООО «Ютрон». Мощность турбины низкокипящего контура (бутанового) 611 кВт, расход бутана 2,33 т/ч, давление 160 МПа, температура 100 °С. Этим параметрам соответствует малогабаритная турбина типа Р-0,6-1,6 ООО «Ютрон».

Тепловая мощность сетевого подогревателя первичного контура 3817 кВт (3,28 Гкал/ч). Параметры греющего пара: расход 6,5 т/ч, давление 25 МПа, температура 127 °С. Этим параметрам соответствует пластинчатый подогреватель марки НН-43-16/1-45ТМ ООО «Ридан».

Выработка электрической энергии паровой турбоустановкой составляет 4,15 млн. кВт·ч в год, турбоустановкой низкокипящего контура – 1,76 млн. кВт·ч в год; всего 5,91 млн. кВт·ч в год. Выработка тепловой энергии в теплофикационном контуре составляет 18 893 Гкал/год.

Исходя из стоимости тепловой энергии 1200 руб/Гкал получаем годовую выручку за сэкономленное на пред-

приятии тепло 22,67 млн. руб. Исходя из стоимости электрической энергии 1,5 руб/кВт·ч получаем годовую выручку за сэкономленную электроэнергию 8,86 млн. руб. Итого, годовая выручка предприятия за сэкономленную тепловую и электрическую энергию составляет 31,53 млн. руб.

Выводы. Расчетами подтверждена возможность обеспечения высокой температуры в кольцевой печи с вращающимся подом путем сжигания смеси подогретого в рекуператорах генераторного газа и воздуха отходящими из нее дымовыми газами, что позволяет осуществлять высокотемпературное твердофазное восстановление и жидкофазное разделение продуктов восстановления железа при нагреве формованных рудно-угольных материалов. Показаны пути повышения эффективности процесса металлизации за счет более полной утилизации тепла отходящих из кольцевой печи дымовых газов для производства электроэнергии и вторичного тепла, а также при изменении схемы движения теплоносителей при подогреве воздуха и рудно-угольных материалов. Расчетами определен ряд технологических параметров (расходы, температуры, давление) энерготехнологической установки для металлизации формованных рудно-угольных материалов. Подобрано теплоутилизирующее оборудование, в технологическую схему введено охлаждающее устройство для обеспечения безопасной работы магнитного сепаратора. Выполнена ориентировочная оценка эффективности мероприятий по модернизации энерготехнологической установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Копоть Н.Н. и др. Принципы выбора технологии прямого получения железа // Сталь. 2006. № 6. С. 42 – 46.
2. Разаз Юнес, Опрышко И.А., Лобода П.И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом // Вестник НТУУ «КПИ». 2011. № 61. С. 184 – 192.
3. Пат. 93802 РФ. Технологическая линия для производства металлизированного продукта / В.Г. Григорьев, П.Г. Паткин, С.В. Тепикин. 2010. Бюл. № 13.
4. Дубровский Б.А., Шилиев П.В., Редин Е.В. и др. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна. – В кн.: Сб. трудов VI Международной конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности, печные агрегаты, экология». – М: МИСиС, 2012. С. 178 – 182.
5. Боковиков А.Б., Боковиков Б.А., Горбачев В.А. и др. Математическая модель технологии производства гранулированного чугуна на движущейся подине. – В кн.: Сб. трудов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло». – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2014. С. 62 – 67.
6. Мастрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Т.2. Расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.
7. Бабошин В.М., Кричевцов Е.А., Абзалов В.М. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии. Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.

8. Сторожев Ю.И. Исследование теплообменных процессов при нагреве окатышей в трубчатой печи: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Свердловск, 1970. – 17 с.
9. Сторожев Ю.И., Телегин А.С., Заварзин В.П. Определение теплоемкости рудно-угольных окатышей в процессе металлизации // Изв. вуз. Черная металлургия. 1971. № 5. С. 27 – 29.
10. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Ратников В.Ф. и др. Теплотехнические расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.
11. Еремин Н.И., Наумчик А.Н., Казаков В.Г. Процессы и аппараты глиноземного производства. – М.: Металлургия, 1980. – 360 с.
12. Гринман М.И., Фомин В.А. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». 2006. № 2.

Поступила 16 июня 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 4, pp. 235–240.

METALLIZATION OF MOLDED ORE-COAL MATERIALS IN CIRCULAR FURNACE

Storozhev Yu.I., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Thermal Engineering and Hydraulic Gas Dynamics* (albino@krasmail.ru)

Podborskii L.N., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of thermal power Stations*

Khudyakov I.A., *Student of the Chair of Thermal Engineering and Hydraulic Gas Dynamics*

Siberian Federal University (79, Svobodnyi ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia)

Abstract. The article describes the calculation results of technological parameters of metallization process of molded ore-coal materials in circular furnace with rotary bottom heated by generator gas. The circular furnace waste gases heat utilization system can be improved by means of additional contours after steam turbine, allowing to produce heat and electrical energy. The scheme of heat carrier transportation to recuperates for air and generator gas heating and to grating for spherules or briquettes heating was changed to achieve higher temperatures. The potential economic effect from the technical transformations of energy technological installation was calculated for metallization of ore-coal materials.

Keywords: metallization, formed materials, circular furnace, heat utilization, steam turbine, heat contour.

REFERENCES

1. Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Kopot' N.N., Rybkin V.S., Shavrin S.V. Selecting technology for direct iron production. *Steel in Translation*. 2006, vol. 36, no. 6, pp. 51–56.
2. Razaz Younes, Opryshko I.A., Loboda P.I. Analysis of technologies of direct metal oxides reduction in circular furnaces. *Vestnik NTUU "KPI"*. 2011, no. 61, pp. 184–192. (In Russ.).
3. Grigor'ev V.G., Patkin P.G., Tepikin S.V. *Tehnologicheskaya liniya dlya proizvodstva metallizirovannogo produkta* [Processing line for metallized production]. Patent RF no. 93802. *Byulleten' izobretenii*, no. 13, 2010. (In Russ.).
4. Dubrovskii B.A., Shilyaev P.V., Redin E.V. etc. Metal coating of spatic iron ores of the Bakalsky deposit and production of granulated iron. In: *Sb. trudov VI Mezhdunarodnoi konferentsii «Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti, pechnye agregaty, ekologiya»* [Papers of the VI International conference «Energy saving technologies in industry, combustion equipment, environment protection»]. Moscow: MISiS, 2012, pp. 178–182. (In Russ.).
5. Bokovikov A.B., Bokovikov B.A., Gorbachev V.A. etc. Mathematic model of technology of granulated iron production on moving furnace hearth. In: *Sb. trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tvorcheskoe nasledie V.E. Grum-Grzhimailo»* [Papers of International scientific and practice conference «Artistic legacy of V.Ye. Grum-Grzhymaylo»]. Ekaterinburg: izd. UrFU, 2014, pp. 62–67. (In Russ.).
6. Mastryukov B.S. *Teoriya, konstruktii i raschety metallurgicheskikh pechei. T.2. Raschety metallurgicheskikh pechei* [Theory, construction and design of metallurgical furnaces. Vol. 2. Design of metallurgical furnaces]. Moscow: Metalurgiya, 1978. 272 p. (In Russ.).
7. Baboshin V.M., Krichevstov E.A., Abzalov V.M. *Teplofizicheskie svoystva topliv i shikhtovykh materialov chernoi metallurgii. Spravochnik* [Thermo-physical properties of fuel and charge materials in ferrous metallurgy. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 152 p. (In Russ.).
8. Storozhev Yu.I. *Issledovanie teploobmennyykh protsessov pri nagreve okatyshей v trubchatoi pechi: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Study of heat exchange process during pellets heating in tube-type furnace: Cand. Tech. Sci. diss.]. Sverdlovsk, 1970. 17 p. (In Russ.).
9. Storozhev Yu.I., Telegin A.S., Zavarzin V.P. Evaluation of heat absorption capacity of ore-coal pellets during metallization. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1971, no. 5, pp. 27–29. (In Russ.).
10. Kitaev B.I., Zobnin B.F., Ratnikov V.F. etc. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermo-technical design of furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 528 p. (In Russ.).
11. Eremine N.I., Naumchik A.N., Kazakov V.G. *Protsessy i apparaty glinozemnogo proizvodstva* [Processes and equipment for alumina production]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 360 p. (In Russ.).
12. Grinman M.I., Fomin V.A. Prospects of application of low capacity power systems with low-boiling liquids. *Elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii «Ekologicheskie sistemy»*. 2006, no. 2. (In Russ.).

Received June 16, 2014