

7. Лялюк В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки: монография / В. П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги. 1999. – 164 с.

8. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: монография / И. Г. Товаровский. – Днепропетровск: Журфонд, 2015. – 912 с.

9. Коробчанский И. Е. Расчеты аппаратуры для улавливания химических продуктов коксо-

вания / И. Е. Коробчанский, М. Д. Кузнецов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1972. – 296 с.

10. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива / В. А. Ноздрачев, С. Л. Ярошевский, В. П. Терещенко. – Донецк: Новый мир, 1996. – 173 с.

Поступила 27.01.2016



УДК 669.162.1

Наука

**А. С. Мных /к. т. н./, И. Г. Яковлева /д. т. н./,
М. Ю. Пазюк /д. т. н./, А. А. Жеребцов**
Запорожская государственная инженерная академия

Оптимизация структуры слоя агломерационной шихты с целью стабилизации теплового режима процесса спекания

В работе предложен алгоритм управления загрузочным устройством агломерационной машины с целью формирования оптимальной структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию, и реализовано численное решение оптимизационной задачи.

Приведены результаты активного эксперимента со спеканием агломерата и проанализировано влияние условий формирования слоя шихты на тепловой режим и производительность процесса. (Ил. 4. Библиогр.: 10 назв.).

Ключевые слова: агломерационный процесс, загрузочный лоток, сегрегация, горизонт слоя, алгоритм управления.

In this paper we propose a control algorithm of the boot device sintering machine to form the optimal structure of the charge layer to be sintered is prepared and implemented numerical solution of the optimization problem.

The results of active experiment with the sintering of the agglomerate and the influence of conditions of formation of a layer charge on the thermal regime and productivity of the process.

Key words: sintering process, feed chute, segregation, horizon layer, a control algorithm.

Введение

Эффективность работы конвейерных машин в значительной степени зависит от совершенствования технологий шихтоподготовки, окомкования и загрузки шихты на паллеты агломашины, что обуславливает формирование слоя материала с заданными характеристиками. Последнее обеспечивается за счет использования загрузочных устройств различной конструкции. В свою очередь, эффективное управление формированием слоя шихты обеспечивается только в случае взаимосвязи газодинамических характеристик слоя материала и теплового режима спекания с производительностью процесса.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных конвейерных машин показал, что отсутствие указанных выше взаимосвязей приводит к тому, что корректировка структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию, происходит через значительный интервал времени, после изменения теплового режима и газодинамического состояния слоя.

Отсутствие контроля структурных характеристик материала на паллетах агломашины не позволяет оперативно анализировать изменение распределения химкомпонентов и газодинамики слоя шихты и, следовательно, оперативно корректировать режим загрузки.

Анализ исследований и публикаций. Вопросы исследования влияния таких параметров, как газопроницаемость слоя, сегрегация шихтовых компонентов, условия формирования структуры слоя, посвящены работы ряда ученых.

Авторы [1] связывают скорость фильтрации газа с параметрами слоя и разрежением воздуха под колосниковой решеткой. Таким образом, вертикальная скорость спекания прямо пропорциональна газопроницаемости шихты, измеряемой количеством воздуха, проходящим через 1 м² площади всасывания агломашины.

Газопроницаемость спекаемого слоя можно существенно повысить, если обеспечить заданную сегрегацию частиц по его высоте [2; 3] при загрузке шихты на аглоленту. В работе [4] определены количественные возможности интенсификации процесса спекания за счет перераспределения частиц шихты различного размера по высоте слоя. Для агломерационной шихты газопроницаемость слоя с максимальной неоднородностью по высоте отличается от газопроницаемости слоя однородной структуры, загруженного без сегрегации, примерно на 20 %.

В работах [5; 6] также дана оценка влияния сегрегации на газопроницаемость слоя. Согласно приведенным данным, управление сегрегацией частиц слоя аглошихты вызывает увеличение его газопроницаемости в среднем на 15 %.

Прочностные характеристики агломерата во многом зависят от закономерностей изменения химического состава и теплового режима процесса спекания по высоте слоя. В агломерационной шихте флюс и топливо сосредотачиваются во фракции 0–3 мм, на долю которой приходится около 83 % углерода и 73 % окиси кальция [7]. Поэтому сегрегация шихты по гранулометрическому составу вызывает сегрегацию по содержанию топлива, и будет оказывать влияние на тепловой режим спекания и, следовательно, на прочность агломерата. Начальный период спекания, при стандартных условиях загрузки шихты с использованием барабанного питателя и отражательного листа, характеризуется недостатком тепла, поэтому верхняя часть спека, достигающая одной трети всей спекаемой массы материала, является наименее прочной.

С целью стабилизации теплового режима процесса спекания агломерата в работе [8] расчетным путем получено оптимальное распределение твердого топлива и фракционного состава полидисперсной шихты по горизонтам слоя. В работе [9] предложено использование усовершенствованного узла загрузки материала в виде составного загрузочного лотка. Последнее, по результатам моделирования распре-

деления фракционного состава шихты по высоте слоя, позволит максимально приблизиться к условиям требуемой сегрегации фракций шихты и твердого топлива.

Таким образом, как показывает анализ литературных источников, преобладающее влияние на условия протекания агломерационного процесса и качественные характеристики агломерата оказывают структура подготовленного к спеканию слоя железорудного материала и закономерности распределения по его высоте топлива и флюсов.

Постановка задачи

Исходя из того, что тепловой режим спекания агломерата и газопроницаемость слоя шихты зависят от сегрегационных процессов, протекающих в слое загружаемого материала, что обусловлено типом применяемого загрузочного устройства, в работе необходимо решить оптимизационную задачу с целью определения управляющих воздействий на составной лоток, обеспечивающих формирование слоя шихты с заданными характеристиками.

Таким образом, в работе поставлены следующие задачи:

- разработать алгоритм управления загрузочным устройством агломашины с целью формирования оптимальной структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию;
- реализовать численное решение оптимизационной задачи;
- провести активный эксперимент со спеканием агломерата и проанализировать влияние условий формирования слоя шихты на тепловой режим и производительность процесса.

Изложение результатов исследования

Повышения производительности агломерационных машин по кондиционной фракции можно добиться, во-первых, за счет обеспечения заданного распределения химического и гранулометрического составов по высоте слоя, что призвано выровнять тепловой режим спекания агломерата, а во-вторых, за счет снижения газодинамического сопротивления слоя шихты. Таким образом, при загрузке материала на спекательные тележки необходимо комплексно учитывать влияние сегрегации гранул и газодинамики сформированного слоя.

Исследования газодинамических характеристик слоя шихты при различных условиях формирования его структуры позволили сделать вывод, что потери давления в верхних горизонтах слоя, со структурой оптимальной с точки зрения распределения твердого топлива по высоте, больше, чем для исходного материала. Поэтому с этой позиции целесообразно снижение

сегрегации фракций по высоте формирующегося слоя.

С другой стороны, следует отметить, что сегрегационные процессы, влияющие на распределение топлива по высоте слоя, оказывают преобладающее воздействие на металлургические свойства агломерата по сравнению с газопроницаемостью. Таким образом, в качестве критерия оптимальности необходимо выбрать максимальное соответствие оптимальному распределению твердого топлива по высоте спекательной тележки с целью обеспечения стабилизации теплового режима спекания агломерата с учетом снижения потерь давления в слое.

Постановку задачи оптимизации представим в виде:

$$\begin{cases} C_{расч}(h) \rightarrow C_{опт}(h); \\ \sum \Delta P \rightarrow \min. \end{cases}$$

При ограничениях:

$$\begin{cases} \Phi_i + \Phi_{i+1} + \dots + \Phi_n = \Phi_{\Sigma}; \\ d_i \Phi_i + d_{i+1} \Phi_{i+1} + \dots + d_n \Phi_n = d_{ср} \Phi_{\Sigma}; \\ \alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}; \\ C_{\min} \leq C_i \leq C_{\max}; \\ \sum \Delta P_{\min_раб} \leq \sum \Delta P \leq \sum \Delta P_{\max_раб}. \end{cases}$$

где $C_{расч}(h)$, $C_{опт}(h)$ – расчетное и оптимальное содержание топлива в слое, %; $\sum \Delta P$ – суммарные потери давления в слое, Па; Φ_i – содержание i -й фракции, %; d_i – средний диаметр i -й фракции, мм; $d_{ср}$ – средний диаметр частиц слоя, мм; α_i – угол наклона лотка, град; C_i – содержание топлива в горизонте, %; $\sum \Delta P_{\min_раб}$, $\sum \Delta P_{\max_раб}$ – диапазон рабочего перепада давления, Па.

Разработанный алгоритм оптимизации структуры слоя агломерационной шихты приведен на рис. 1. Исходными данными для расчета режима работы загрузочного узла являются параметры шихтовых материалов – фракционный состав, химический состав, содержание топлива, также задаются параметры узла загрузки – длины секций лотка, диапазон варьирования углов их наклона, высота и ширина воздушного зазора. На следующем этапе задается оптимальное распределение твердого топлива по высоте слоя.

Оптимизация условий формирования структуры слоя шихты, сводится к расчету величины управляющего воздействия (в наиболее распространенном случае – углы наклона загрузочного лотка), обеспечивающего заданную сегрегацию материала, т. е. требуемое распределение топлива и газодинамику слоя.

После задания исходных данных и требуемого распределения твердого топлива организуется внешний цикл по изменению угла наклона первой секции загрузочного лотка α_{1i} . Внутри данного цикла производится расчет конечных скоростей V_{ki} для каждой из фракций исходной шихты. Частицы, конечная скорость которых не соответствует условию $V_k > V_{\min}$, формируют верхний горизонт слоя, ссыпаясь в воздушный зазор, остальные частицы переходят на второй лоток с углом наклона α_{2i} (в алгоритме организована соответствующая проверка).

На следующем этапе создается внутренний цикл по изменению угла наклона второй секции загрузочного лотка α_{2i} , внутри которого рассчитываются скорости схода частиц с его поверхности V_c . Исходя из полученных данных о скоростях движения частиц при соответствующих углах наклона α_{1i} , α_{2i} , производится расчет фракционного состава горизонтов слоя.

Определение потерь давления в горизонтах производится на основании предварительного расчета эквивалентного диаметра каналов и коэффициента газодинамического сопротивления. После расчета параметров по всем горизонтам осуществляется расчет суммарных потерь давления в слое, изменения среднего диаметра частиц и распределения твердого топлива по его высоте.

По завершению внутреннего (по α_2) и внешнего (по α_1) циклов получаем двумерные массивы данных в виде зависимостей $C_{расч} = f(\alpha_1, \alpha_2)$ и $\sum \Delta P = f(\alpha_1, \alpha_2)$. Данные массивы данных обрабатываются с целью определения α_1 , α_2 при которых обеспечивается наилучшее совпадение расчетного и оптимального распределения твердого топлива, а также минимальные потери давления по высоте слоя. Далее, с учетом приоритетности требуемого распределения топлива, выбираются углы наклона секций загрузочного устройства, обеспечивающие оптимальную структуру слоя агломерационной шихты.

Программная реализация представленного алгоритма осуществлена на языке программирования Object Pascal.

Исходя из того, что углы наклона секций лотка варьировались в диапазоне $\alpha_1(45 \div 58^\circ)$, $\alpha_2(45 \div 60^\circ)$, получено 224 комбинации расположения поверхностей загрузочного узла, обеспечивающих соответствующее распределение топлива. Наиболее наглядные результаты расчетов распределения топлива в слое при заданных углах наклона секций лотка представлены на рис. 2.

Из полученных результатов видно, что при низких углах наклона сегрегационные про-

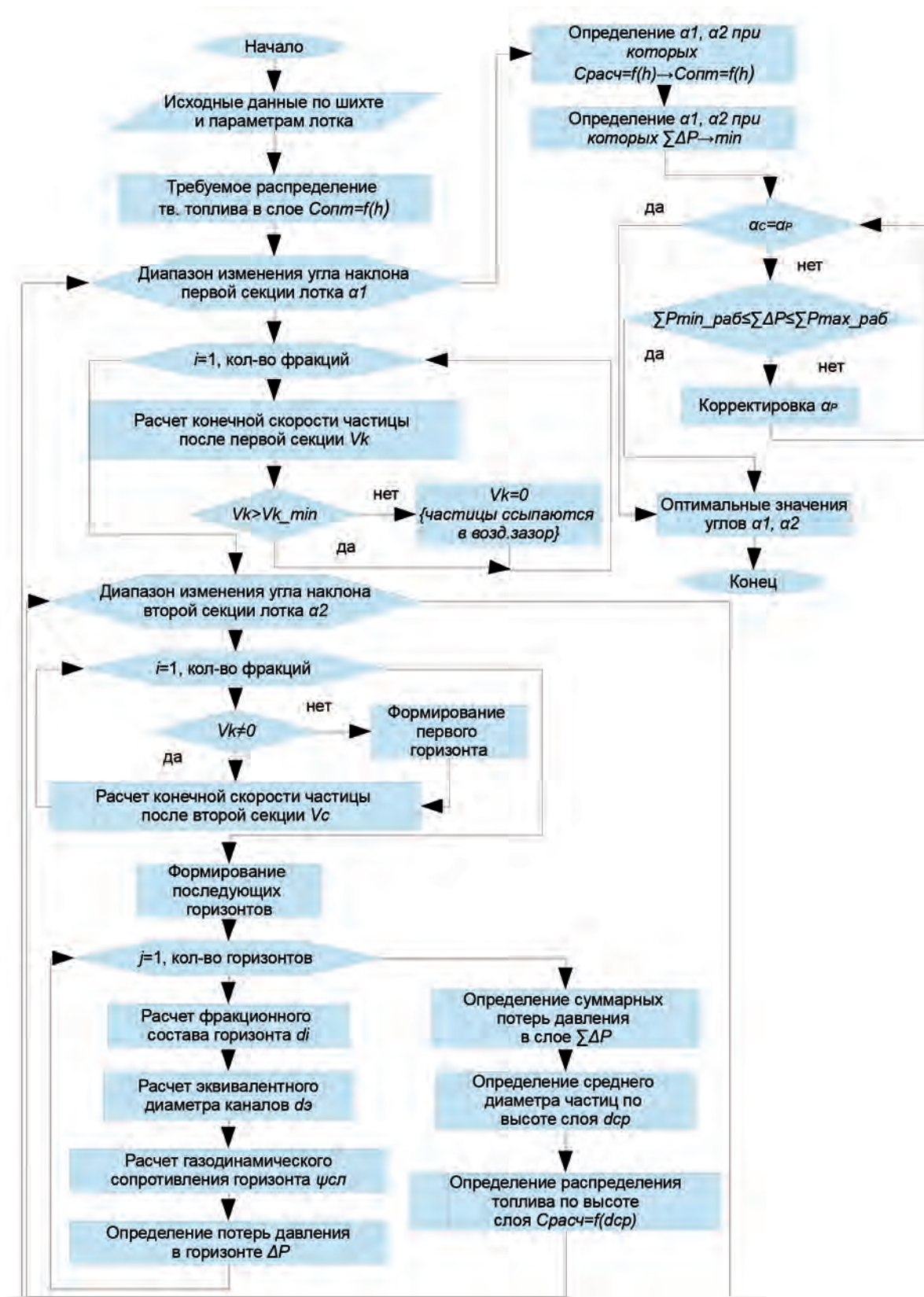


Рис. 1. Алгоритм расчета управляющих воздействий на загрузочное устройство с целью оптимизации структуры слоя агломерационной шихты

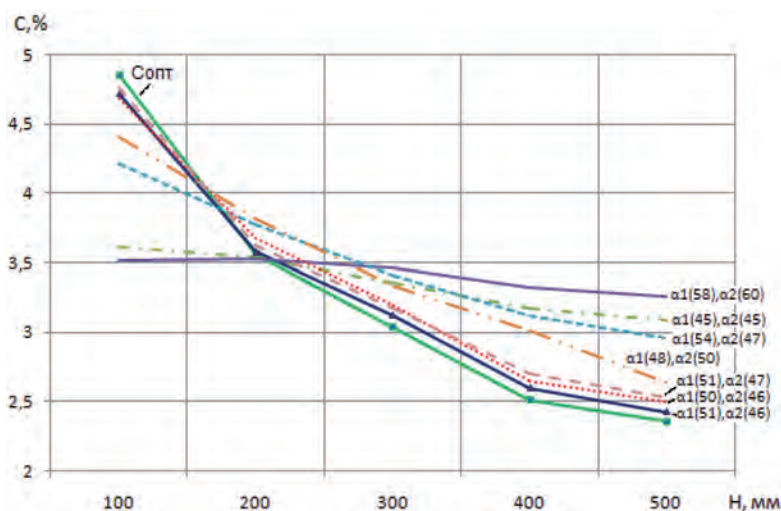


Рис. 2. Результаты расчетов распределения топлива в слое

цессы в слое протекают слабо, за счет того, что крупные частицы не приобретают достаточной кинетической энергии для их концентрации в нижних горизонтах слоя. В свою очередь, большие значения углов наклона лотков влекут за собой движение частиц шихты в режиме скольжения, что также пагубно сказывается на сегрегации классов крупности частиц, и, как следствие, наблюдается практически равномерное распределение топлива по высоте слоя.

Наилучшее соответствие оптимальному распределению топлива обеспечивается при значениях углов наклона загрузочного устройства $\alpha_1(51^\circ), \alpha_2(46^\circ)$.

Результаты расчетов потерь давления в слое при использовании всех комбинаций углов наклона секций загрузочного лотка представлены на рис. 3 и 4.

Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод, что минимальные потери давления в слое обеспечиваются при комбинации углов наклона составного загрузочного лотка $\alpha_1(51^\circ), \alpha_2(47^\circ)$. Также очевидно, что дальнейшее увеличение углов наклона секций лотка ухудшает сегрегационные процессы в слое и, следовательно,

его газодинамику. Последнее вызвано тем, что средние и крупные частицы, движущиеся с высокими скоростями, увлекают за собой в нижние горизонты мелкие фракции, в результате чего уплотняется структура загружаемого слоя.

Анализ эффективности мероприятий по усилению сегрегационных процессов в слое загружаемого материала за счет использования составного загрузочного лотка проведен методом активного эксперимента на опытной установке аглоцефа для спекания агломерата МК «Запорожсталь» [10].

Общее содержание топлива в шихте составило 3,3 %, и закономерность его распределения максимально приближена к результатам теоретического расчета оптимального распределения твердого топлива по горизонтам слоя [8].

Высота слоя загружаемого материала составила 500 мм, что соответствует условиям работы агломашины № 1 предприятия.

Результаты экспериментов позволили сделать вывод, что при использовании загрузочного лотка предложенной конструкции улучшаются сегрегационные процессы в слое: количество фракции 3 мм в верхних горизонтах слоя

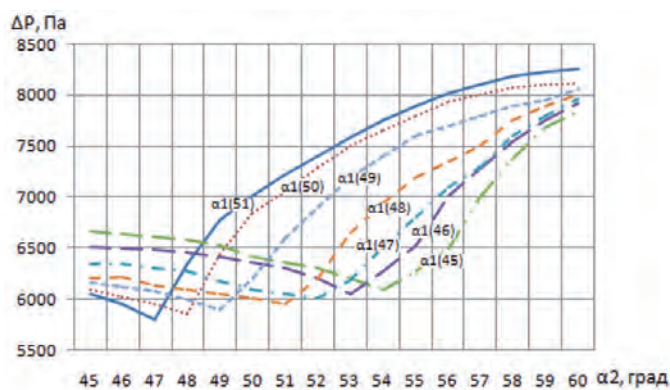


Рис. 3. Потери давления в слое при изменении α_1 ($45 \div 51^\circ$)

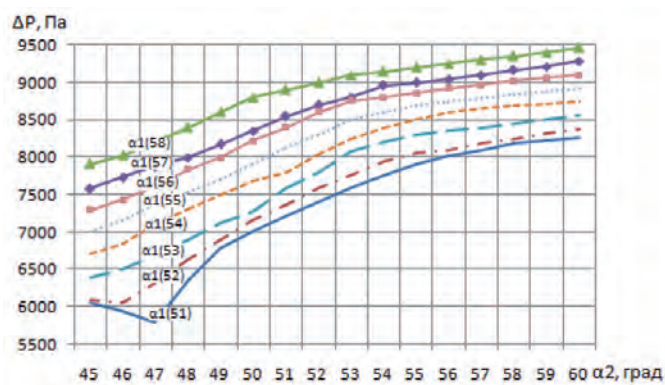


Рис. 4. Потери давления в слое при изменении α_1 ($51 \div 58^\circ$)

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

(0–100 мм) увеличилось с 54,3 до 59,6 % по сравнению с действующей на предприятии схемой загрузки. Среднее содержание топлива на этих горизонтах возросло с 3,8 %, при использовании схемы «барабанный питатель – загрузочный лоток», и 4,4 %, при схеме «вибрационный питатель – загрузочный лоток», до 4,76 %, при условии сокращения общего содержания твердого топлива в шихте с 3,6–3,8 до 3,3 %.

Результаты испытаний свидетельствуют, что стабилизация теплового режима процесса спекания позволила повысить механическую прочность и выход годного на 4,22 %. Полученное сокращение потребления коксика, при сохранении качественных показателей процесса спекания, потенциально позволит экономить до 216 тыс. грн в год с одной агломашины для условий аглофабрики предприятия.

Выводы

В работе приведен разработанный авторами алгоритм управления загрузочным устройством агломашины с целью формирования оптимальной структуры слоя шихты, подготовленной к спеканию. Численное решение оптимизационной задачи представленного алгоритма осуществлено на языке программирования Object Pascal.

Результаты расчетов позволили установить оптимальные значения углов наклона секций составного загрузочного лотка α_1 (51°), α_2 (47°), обеспечивающих наилучшее соответствие оптимальному распределению твердого топлива и снижение потерь давления по высоте слоя агломерационной шихты.

Анализ результатов активного эксперимента по спеканию агломерата позволил сделать вывод об эффективности предложенных решений, обеспечивающих улучшение качественных показателей агломерата при сокращении общего потребления твердого топлива.

Библиографический список

1. Коротич В. И. Газодинамика агломерационного процесса / В. И. Коротич, В. П. Пузанов. – М.: Металлургия, 1969. – 206 с.
2. Коршиков Г. В. Влияние строения структурных элементов агломерационной шихты на

газодинамическую характеристику спекаемого слоя / Г. В. Коршиков, М. А. Хайков, Н. Н. Должикова // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. – № 6. – С. 12–15.

3. Фролов Ю. А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин / Ю. А. Фролов // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 42–51.

4. Исследование и совершенствование укладки шихты на агломашину / С. Н. Петрушов, А. П. Полухин, Л. М. Рудаков, А. И. Капуста [и др.] // Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса: сборник. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 29–33.

5. Matsumura T. Development of new feeding equipment for controlling charge segregation of sinter feed / T. Matsumura, S. Amano, H. Asahara // Current Advances in Materials and Processes. – 1999. – № 4. – P. 766.

6. Nakano M. Sintercake Structure Offering High Productivity and High Yield / M. Nakano, T. Kawauchi, S. Kasama // ICSTI Ironmaking Conference Proceedings. – 1996. – P. 183–190.

7. Пазюк М. Ю. Исследование сегрегации топлива в слое шихты / М. Ю. Пазюк, В. И. Гранковский // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1982. – № 12. – С. 6–8.

8. Мных А. С. Определение оптимального распределения твердого топлива в слое загружаемой шихты для выравнивания теплового режима агломерационного процесса / А. С. Мных // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2014. – № 6. – С. 47–51.

9. Мных А. С. Исследование систем загрузки полидисперсной аглошихты с целью обеспечения требуемого теплового режима процесса спекания / А. С. Мных // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 30. – С. 53–58.

10. Мных А. С. Исследование влияния теплового режима процесса спекания на качественные показатели агломерата / А. С. Мных // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 4 (135). – С. 46–51.

Поступила 26.01.2016

Metallurgical and Mining
Industry

www.metalljournal.com.ua