

5. New technology to download batch sintering machine / Y.S. Kravets [et al.] // Metallurg. – 1982. – №9. – P. 15-17. (Rus.)
6. Optimization of combustion of gaseous and solid fuel agglomeration / V.V. Dyabin [et al.] // Steel. – 1984. – №7. – P. 8-11. (Rus.)
7. Karabasov Y.S. The use of fuel in the agglomeration / Y.S. Karabasov, V.S/ Valavin. – M. : Metallurgiya, 1976. – 263 p. (Rus.)
8. Efimov S.P. Effect of Particle Size of fuel on the sintering process and the quality of sinter / S.P. Efimov, G.G. Efimenko // Proceedings of the universities ferrous metallurgy. – 1970. – №9. – P. 21-24. (Rus.)
9. On the mechanism of the effect of particle size on the coke fines agglomeration process / Y.S. Karabasov, A.N. Pohvisnev, E.F. Shkyrko [et al.] // Proceedings of the universities ferrous metallurgy. – 1975. – №11. – P. 22-26. (Rus.)
10. On the effective reactivity sintering fuel and optimal height of the sintered layer / Y.S. Karabasov, [et al.] // Proceedings of the universities ferrous metallurgy. – 1975. – №3. – P. 36-40. (Rus.)
11. Hlaponin N.S. About two-layer sintering aglopan / N.S. Hlaponin, V.N. Krivosheev, V.V. Andronov // Metallurgical and Mining Industry. – 1967. – №4. – P. 8-10. (Rus.)
12. Analysis of the gas-dynamic work sintering machines AKM-312 NLMK / Y.A. Frolov, B.S. Rasin, S.L. Zevin [et al.] // Steel. – 1993. – №2. – P. 5-10. (Rus.)
13. Efimenko G.M. Fuel supply to the sinter mix on the sinter plant ZSMK on a two-layer scheme / G.M. Efimenko, V.V. Dyabin, B.I. Kolokoltsov // Steel. – 1974. – №10. – P. 876-878. (Rus.)
14. Michalevic A.G. The degree of fuel used for different modes of sintering / A.G. Mikhalevich, A.I. Kuznetsov, V.E. Tikhomirov // Proceedings of the universities ferrous metallurgy. – 1979. – №9. – P. 149-151. (Rus.)
15. Pat. 78006 Ukraine, Int. Cl. C 22 B 1/16. Method agglomeration ferrous materials / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, O.D. Ychitel, D.A. Kassim, I.A. Liakhova, E.V. Chuprinov. – № u201208002; filed 27.06.12; publication 11.03.13, Bull. №5. (Ukr.)
16. Pat. 78007 Ukraine, Int. Cl. C 22 B 1/16. Method agglomeration ferrous materials / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, O.D. Ychitel, D.A. Kassim, I.A. Liakhova, E.V. Chuprinov. – № u201208003; filed 27.06.12; publication 03.11.13, Bull. №5. (Ukr.)
17. Pat. 76683 Ukraine, Int. Cl. C 22 B 1/16. Method agglomeration ferrous materials / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, O.D. Ychitel, D.A. Kassim, I.A. Liakhova, E.V. Chuprinov. – № u201208164; filed 03.07.12; publication 01.10.13, Bull. №1. (Ukr.)

Рецензент: А.Д. Учитель  
д-р техн. наук, проф., КМИ ГВУЗ «КНУ»

Статья поступила 23.03.2015

УДК 669.046.44 : 622.788

© Семакова В.Б.<sup>1</sup>, Пилюгин Е.И.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

*В статье приведены различные показатели производительности агломерационного процесса и результаты их сравнительного анализа на основе лабораторных спеканий агломерата и производственных данных с учетом качества годного продукта.*

**Ключевые слова:** агломерационная шихта, производительность, аглоспек, первичный и вторичный возврат, стандартно стабилизированный агломерат.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [semakova\\_v@mail.ru](mailto:semakova_v@mail.ru)

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [jackpilugin@mail.ru](mailto:jackpilugin@mail.ru)

*Семакова В.Б., Пілюгін Є.І. Дослідження показників продуктивності агломераційного процесу. У статті наведені різні показники продуктивності агломераційного процесу та результати їх порівняльного аналізу на основі лабораторних спікань агломерату та виробничих даних з урахуванням якості годного продукту.*

*Ключові слова:* агломераційна шихта, продуктивність, аглоспек, первинне та вторинне повернення, стандартно стабілізований агломерат.

*V.B. Semakova, E.I. Pilyugin. Investigation of the sintering process productivity factors. The process of sintering is characterized by the circulation load - the return, which is both a production intensifier and a production fault. The return mode influences upon productivity of a sintering plant and the quality of the sinter. In production conditions the output of the return is self-balanced because of the product's strength and the way of sinter cake processing. So it is required to try to reach balanced return in order to get objective results in laboratory conditions. Various factors of the sintering process productivity determined from wet charge, from charge with return, from finished sinter cake from standard stabilized sinter cake under closed cycle of return were analyzed in this article. In laboratory conditions a comparative evaluation of the sintering process productivity by raw charge and finished sinter cake output under a closed balanced cycle of return is most objective. Evaluation of productivity without any regard to the amount of the return in charge materials leads to biased results of investigations. A stabilized balance of return is supposed to take place under production conditions. The existing method of a sintering plant productivity evaluation is based on the shipped finished sinter cake output, without consideration for the quantity of the fine fraction, removed before charging into blast furnaces (secondary return), which is also added into sinter charge. Hence, a comparative evaluation of specific productivity of the sintering process must be made with due regard of the aggregate output of return or the strength of the sinter cake. Evaluation of specific productivity by stabilized sinter cake makes it possible to predict the output of finished sinter cake of high strength. An intensifying action upon the sintering process also depends upon the size of the return. In further investigations it is necessary to analyze the possibilities of controlling the return mode by means of preliminary granulation of its small fractions.*

*Keywords:* sinter charge, productivity, sinter cake, primary and secondary return, standard stabilized sinter.

**Постановка проблеми.** Удельная производительность агломерационного процесса в производственных условиях определяется массой годного продукта, спеченного на одном квадратном метре агломерационной ленты в единицу времени, и составляет для аглофабрик СНГ  $0,96 - 1,88 \text{ т} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  [1]. Однако к годному агломерату относят продукт с различным содержанием мелочи, разной крупностью частиц, нижний предел размера которых варьируется в пределах 6 – 12 мм, и различной способностью к дальнейшему разрушению, что влияет на оценку производительности аглофабрики [2-5]. Изменение минимального размера частицы годного агломерата на 1 мм в интервале крупности 6 – 10 мм для офлюсованных агломератов приводит к изменению выхода годного на 5-7%, а, следовательно, существенно сказывается на производительности аглопроцесса и количестве некондиционного агломерата, возвращаемого на повторное спекание. Кроме того, расчет производительности агломерационного процесса по выходу годного агломерата, когда годный продукт ограничивается выходом кусков определенного класса крупности из аглоспека без учета количества возврата в шихте, приводит к искажению результатов исследований, полученных в лабораторных условиях [5].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Наличие экстремальной зависимости между производительностью агломашины и количеством возврата в шихте, а также возможность выделения из аглоспека определенного количества годного продукта обуславливает тесную взаимосвязь между количественными и качественными показателями производимого агломерата [5], схематично представленными на рис. 1.

При производстве агломерата в исходную сырую шихту ( $M_{\text{ш}}$ , кг), которая состоит из аглоруды (размер частиц  $d \leq 10$  мм), железорудного концентрата ( $d \approx 0,05$  мм), топлива и флюсов

( $d \leq 3$  мм), также добавляется возврат ( $M_B$ , кг) – мелкий некондиционный агломерат, выделенный из аглопилога предыдущего спекания (рис. 1). В заданном соотношении компоненты смешиваются, а затем перед спеканием агломерационная шихта ( $M_{ш} + M_B$ , кг) окомковывается, чтобы повысить газопроницаемость ее слоя на аглоленте. Отношение массы возврата к общей массе агломерационной шихты характеризуется долей возврата в шихте  $\varphi$ , д. ед. В ходе спекания из сырой шихты удаляются летучие вещества и образуется аглоспек (аглопилог), масса которого на 1 т годного агломерата составляет  $M_{сп} = 1000 + M_B$ , кг. Выход аглоспека из шихты  $\varepsilon_{сп}$ , д. ед., определяется отношением масс аглоспека и аглошихты (рис. 1).

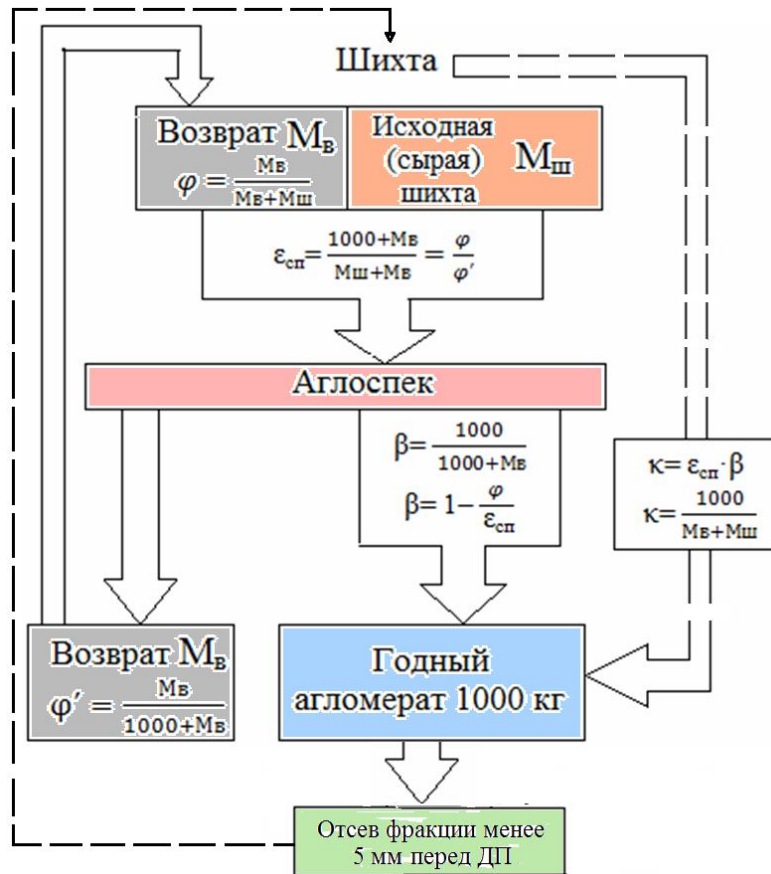


Рис. 1 – Схема движения возврата в агломерационном процессе:  $M_B$  и  $M_{ш}$  – масса возврата и сырой агломерационной шихты, кг/т агломерата;  $\varphi$  и  $\varphi'$  – содержание возврата в шихте и аглоспеке, д. ед.;  $\varepsilon_{сп}$  – выход аглоспека из шихты, кг/кг;  $\beta$  и  $k$  – выход годного агломерата из аглоспека и шихты, д. ед.

После спекания аглопилог подвергают дроблению и рассеву на годный агломерат (1000 кг) и возврат ( $M_B$ ). Отношение массы возврата к массе аглопилога характеризуется долей возврата в аглоспеке  $\varphi'$ , д. ед. Отношение массы годного агломерата к массе аглопилога называют выходом годного  $\beta$  из аглоспека, д. ед., который обусловлен прочностью последнего и схемой его обработки. Коэффициент выхода годного из шихты  $k$ , д. ед., характеризующийся отношением масс годного агломерата и аглошихты, представляет собой произведение выхода аглоспека из шихты и выхода годного из аглоспека. Доля возврата в шихте  $\varphi$  и выход годного агломерата из аглоспека  $\beta$  при замкнутом цикле возврата взаимосвязаны [6]:

$$\beta + \varphi' = 1; \quad \beta = 1 - a\varphi, \tag{1}$$

где  $a$  – отношение выхода возврата из аглоспека и шихты,  $a = 1 / \varepsilon_{сп}$ , д. ед.

В соответствии со схемой (рис. 1), представляющей преобразование при агломерации шихты в конечный продукт, различают производительность агломерационного процесса на различных его этапах.

Часовая производительность аглопроцесса по всей шихте рассчитывается по формуле, учитывающей подобие агломерационной машины конвейерному транспортирующему устройству [7] (рис. 2):

$$Q_{ш} = 60 h b v_n \gamma_{нас}, \text{ т / ч шихты,} \quad (2)$$

$$Q_{ш} = 60 S v_s \gamma_{нас}, \text{ т / ч шихты,} \quad (3)$$

где  $h$  – высота слоя аглошихты, м;  
 $l, b$  – длина и ширина аглоленты, м;  
 $S$  – площадь спекания аглоленты, м<sup>2</sup>;  
 $v_s, v_n$  – вертикальная скорость спекания и скорость движения паллеты аглоленты, м / мин;  
 $\gamma_{нас}$  – насыпная масса шихты, т / м<sup>3</sup>.

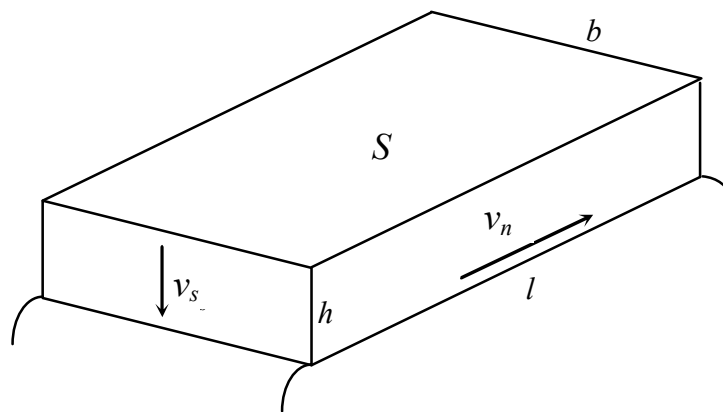


Рис. 2 – Схема слоя шихты, спекаемого на конвейерной агломерационной машине [8]

Часовая производительность аглопроцесса по аглоспеку рассчитывается с учетом потери массы шихты в ходе спекания (горение углерода и серы, диссоциация гидратов, карбонатов и др.):  $Q_{сн} = \varepsilon_{сн} Q_{ш}$ , т / ч.

Часовая производительность аглопроцесса по годному агломерату, т / ч, рассчитывается с учетом его выхода из шихты  $Q_{г} = k Q_{ш}$  или аглопирога  $Q_{г} = \beta Q_{сн}$ , таким образом, учитывается количество отсеянного некондиционного агломерата. В производственных условиях весь возврат направляется на повторное спекание, в результате чего происходит самобалансирование количества возврата в шихте, обусловленное двойственной ролью возврата как брака и интенсификатора агломерационного процесса. В лабораторных условиях для учета рециркуляции определенного количества возврата рассчитывается производительность при замкнутом цикле возврата  $Q_{зц}$  [7, 9].

Однако годный агломерат содержит от 8 до 24% фракции менее 5 мм [1], что обусловлено эффективностью процесса грохочения в ходе обработки аглоспека. Снижение содержания мелочи в агломерате до 8% в условиях МК «Запорожсталь» за счет изменения схемы грохочения привело к одновременному снижению выхода возврата с 32 до 22%, а, следовательно, к повышению производительности аглофабрики по годному агломерату [10]. В работе [11] предложено введение «понятия идеального по массовой доле мелочи агломерата, т. е. агломерата, не имеющего мелочи класса 5-0 мм», и сравнение производительностей аглофабрик, приведенных к производству идеального по массовой доле мелочи агломерата. При этом в расчетной формуле производительности  $Q_{ид}$  необходимо коэффициент выхода годного агломерата  $k$  заменить условным коэффициентом выхода идеального агломерата из шихты  $k_{ид}$ :  $k_{ид} = k (1 - P_{-5}^A)$ , где  $P_{-5}^A$  – содержание фракции менее 5 мм в годном агломерате после отсева на аглофабрике, д. ед.

Однако при транспортировке в доменный цех агломерат дополнительно разрушается, что приводит к увеличению содержания в нем мелочи, ухудшающей технико-экономические показатели доменной плавки. Для улучшения газопроницаемости шихты перед доменными печами (ДП) производят калибровку (получение очищенных от мелких фракций крупных частиц) железорудной части шихты, при этом традиционным классом отсева агломерата принят класс менее 5 мм [10]. Агломерат, поступающий в доменный цех № 1 КГГМК «Криворожсталь» содержит до 22-27% некондиционных фракций, подлежащих отсеву. Мелкие отсеянные в доменном цехе фракции агломерата (вторичный возврат), как и первичный возврат, добавляют в агломерационную шихту (рис. 1). Таким образом, суммарное количество мелких фракций агломерата, возвращаемых на повторное спекание, возрастает до 25-45% [3, 7], однако, не учитывается при определении производительности аглопроцесса.

**Цель статьи** – проанализировать количественную оценку производительности агломерационного процесса различными показателями при изменении прочностных характеристик аглоспека и годного агломерата на основе результатов лабораторных исследований и производственных данных для выявления показателей, обеспечивающих объективное сравнение результатов спеканий.

**Изложение основного материала.** Одним из показателей прочности аглоспека является выход годного агломерата, а, следовательно, и взаимосвязанный с ним выход возврата. Известно [12], что возврат играет двойственную роль в аглопроцессе. С одной стороны, являясь браком, снижает выход годного агломерата, способствуя сокращению производительности аглофабрики, с другой стороны, выполняя роль центров окомкования шихты, улучшает процесс ее грануляции и, следовательно, газопроницаемость спекаемого слоя, чем ускоряет процесс горения топлива и повышает производительность аглопроцесса. Таким образом, влияние количества возврата в агломерационной шихте на производительность процесса носит экстремальный характер. Согласно справочным данным добавка 1% возврата в шихту в интервале до 30% способствует аналогичному повышению производительности аглопроцесса [1].

Исследования изменения производительности аглопроцесса при различном режиме возврата проводились на лабораторной установке (рис. 3).

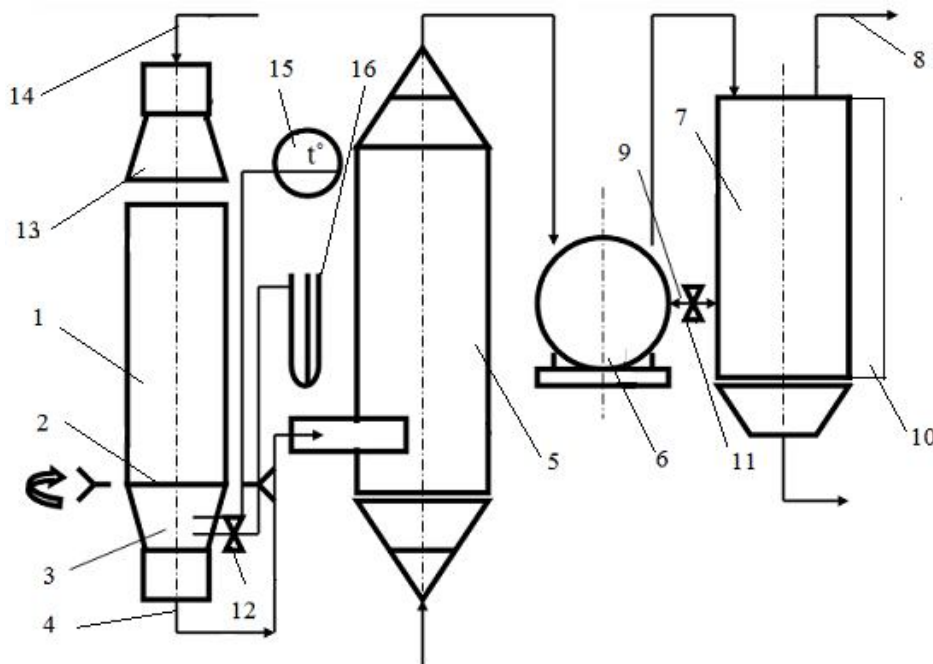


Рис. 3 – Лабораторная установка для агломерации железорудной шихты: 1 – цилиндрическая чаша; 2 – колосниковая решетка; 3 – вакуум-камера; 4 – газопровод; 5 – циклон; 6 – водокольцевой насос; 7 – мокрый пылеуловитель; 8 – труба; 9 – трубка; 10 – водомерное стекло; 11, 12 – вентиль; 13 – газовый горн; 14 – гибкий шланг; 15 – потенциометр; 16 – вакуумметр

Спеканию подвергалась агломерационная шихта (17% аглоруды, 55% железорудного концентрата, 13% известняка, 5% железосодержащего шлама, 5% известковой пыли, 5% топлива) массой 5 кг с 20 и 40% обычного возврата, представляющего собой отсев мелкого агломерата крупностью менее 5 мм, в слое высотой 180 мм при начальном разрежении 10 кПа. В качестве базового принято спекание шихты с 20% возврата, ход которого представлен на рис. 4 кривыми изменения температуры отходящих газов (кривая 1) и разрежения под колосниковой решеткой (кривая 2).

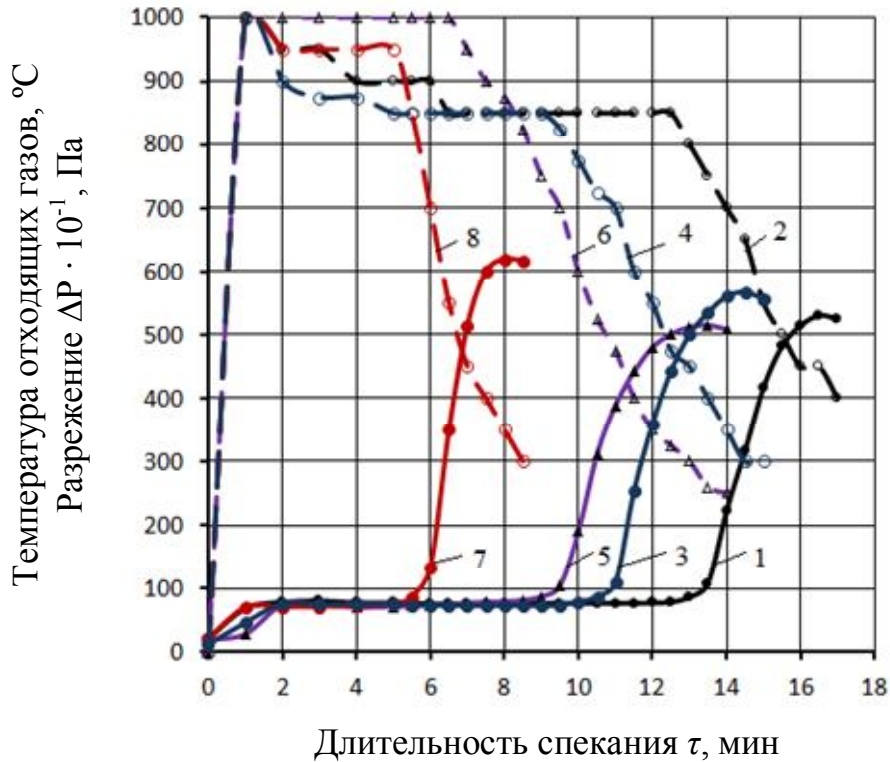


Рис. 4 – Влияние добавок возврата в шихту на показатели аглопроцесса (пояснения в тексте)

Как видно по кривой 1, процесс базового спекания завершился за 16,5 минут при достижении отходящими газами максимальной температуры 530 °С, при этом разрежение под колосниковой решеткой снизилось до 4,5 кПа.

Удельная производительность лабораторной агломерационной установки по шихте рассчитывалась как

$$Q_{\text{уд}} = 0,06 \frac{M}{S\tau}, \text{ т / м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (4)$$

где  $M$  – масса шихты с возвратом, кг;  
 $S$  – площадь колосниковой решетки, м<sup>2</sup>;  
 $\tau$  – длительность спекания, мин;

Удельная производительность по сырой шихте составила 0,934 при  $Q_{\text{уд}} = 1,167 \text{ т / м}^2 \cdot \text{ч}$  (табл.).

Удельная производительность лабораторной агломерационной установки по аглоспеку рассчитывалась аналогично по массе полученного аглоспека  $M_{\text{сп}}$  и составила 0,931 т / м<sup>2</sup> · ч, т. е. выход аглоспека  $\varepsilon_{\text{сп}} = 0,798 \text{ кг / кг}$  шихты с возвратом при выходе твердого остатка из сырой шихты  $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,748 \text{ кг / кг}$  шихты. Выход фракции – 5 мм из аглопилога после дробления составил 17,26% (первичный возврат  $\phi$ ), а выход годного по фракции +5 мм  $\beta = 82,74\%$  соответственно, с учетом которого удельная производительность аглопроцесса по годному агломерату составила 0,770 т / м<sup>2</sup> · ч. В рассмотренном случае прочность аглоспека достаточно высока, а выход первичного возврата по отношению к массе шихты  $\phi = 13,2\%$  – несколько ниже его

исходного количества в шихте, т. е. баланс возврата нарушен. Для сохранения режима возврата на постоянном уровне  $\varphi = 20,0\%$  необходимо додрабливание агломерата или увеличение граничного размера зерна некондиционного агломерата, при этом пониженный выход годного составит 74,94%, а производительность по годному продукту сократится до  $0,698 \text{ т} / \text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Таблица

Результаты лабораторных спеканий агломерата при различном режиме возврата

Показатели	Спекания шихты с содержанием возврата			
	20 %		обычного 40 % при	
	обычного (базовое)	крупного	базовом РТ	повышенном РТ
Удельная производительность, $\text{т}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ :				
- по шихте с возвратом	1,167	1,426	1,328	2,406
- по сырой шихте	0,934	1,141	0,797	1,444
- по аглоспеку	0,931	1,138	1,011	1,882
- по выходу годного (фр. +5 мм)	0,770	0,930	0,850	1,492
- при замкнутом цикле возврата	0,698	0,853	0,514	0,948
- по выходу стандартно стабилизированного агломерата	0,529	0,659	0,614	1,089
Выход годного из аглоспека, %:				
- по фракции + 5 мм	82,74	81,73	84,04	79,27
- при замкнутом цикле возврата	74,94	74,94	50,88	50,39
- стандартно стабилизированного агломерата	56,86	57,94	60,76	57,87
Прочность $X$ , %	68,72	70,86	72,30	73,00

В производственных условиях происходит дальнейшее разрушение агломерата и образование дополнительного количества мелочи (вторичного возврата) при транспортировке окускованного материала в доменный цех, которое обусловлено прочностными характеристиками годного агломерата и затраченной на его разрушение работой. Для прогнозирования характера изменения гранулометрического состава агломерата в лабораторных условиях проводят исследования его «холодной» прочности во вращающемся барабане. Начальный период обработки кусков агломерата при сравнительно небольших затратах энергии характеризуется разрушением крупных кусков по макропорам – «этап индивидуализации блоков», затем переходит в режим истирания, который характеризуется меньшей интенсивностью разрушения и большим расходом энергии, – «этап сфероидизации блоков» [7].

Согласно исследованиям [13] при полном отсеве мелкой фракции выход стабилизированного агломерата приближается практически к 50%. Следовательно, по результатам лабораторных исследований целесообразно рассчитывать выход стандартно стабилизированного агломерата из аглоспека  $k_{exp} = k_{+5} \cdot X$ , д. ед. [14], где  $k_{+5}$  – выход фракции +5 мм из аглоспека (годный агломерат), д. ед.;  $X$  – прочность агломерата (выход фракции +5 мм из пробы годного агломерата после испытания в барабане согласно ДСТУ 3200-95), д. ед., и соответствующую ему производительность агломерационного процесса:

$$Q_{st} = k_{exp} Q_{cn}, \quad (5)$$

Определение удельной производительности по выходу стандартно стабилизированного агломерата из аглоспека, которая для базового спекания составляет  $0,529 \text{ т} / \text{м}^2 \cdot \text{ч}$  при  $k_{exp} = 0,569$  д. ед., позволяет прогнозировать количество вторичного возврата.

Из результатов базового спекания следует, что 43% аглопирога под воздействием стандартного разрушения во вращающемся барабане превратилось в мелкую фракцию, непригодную для загрузки в доменные печи. Зарубежная практика спекания железорудного агломерата предполагает соответствующую повышенную долю возврата в шихте до 35-44% при отгрузке более прочного годного продукта, содержащего 1,3-7,8% мелочи [3]. Результаты лабораторных спеканий шихты с увеличением содержания возврата до 40% представлены на рис. 4 кривыми

изменения температуры отходящих газов (кривая 3) и разрежения под колосниковой решеткой (кривая 4). Длительность процесса спекания сократилась на 2 минуты, при этом производительность по шихте с возвратом выросла на 13,8%, по аглоспеку – на 8,6%, по выходу годного – на 10,3%, по выходу стандартно стабилизированного агломерата – на 16,1% за счет повышения прочности агломерата на 3,6% абс. при увеличенной доле возврата в шихте. Однако, выход возврата из аглоспека даже после стабилизации  $\varphi'_{cm} = 1 - k_{exp} = 0,392$  д. ед. не обеспечивает замкнутого цикла возврата, так как выход возврата по отношению к массе шихты в этом случае составляет  $\varphi_{cm} = 0,299$  д. ед., вследствие чего производительность при замкнутом цикле возврата снижается на 26,3%. Таким образом, повышение доли возврата в шихте при постоянстве исходного состава сырой шихты обеспечило рост ее газопроницаемости и производительности аглопроцесса на 9-16% в лабораторных условиях без сохранения баланса возврата в шихту, что является недостаточным для покрытия необходимого расхода возврата в шихту в производственных условиях. Удельная производительность аглопроцесса по сырой шихте при неизменном ее составе и повышении содержания возврата в шихте с 20 до 40% снизилась на 14,8%, что свидетельствует об объективном снижении производительности агломерационного процесса, несмотря на прирост производительности по всей шихте, годному продукту и стандартно стабилизированному агломерату в лабораторных условиях. Следовательно, в лабораторных условиях для получения объективных результатов исследований необходимо стремиться к достижению режима возврата, установившегося в результате его самобалансирования (замкнутый сбалансированный цикл возврата постоянной крупности).

Как известно [12], повышенный расход возврата в шихту требует увеличения расхода топлива. Ход процесса агломерации с содержанием коксика в сырой шихте 6,8% при сохранении его доли в общей массе шихты на уровне базового спекания представлен на рис. 4 кривыми изменения температуры отходящих газов (кривая 7) и разрежения под колосниковой решеткой (кривая 8). Длительность процесса спекания сократилась на 8,5 минут по сравнению с базовым спеканием (кривые 1, 2). Удельная производительность по шихте с возвратом выросла на 106,2%, по аглоспеку – на 102,1%, по выходу годного – на 93,6%, по выходу стандартно стабилизированного агломерата – на 105,7%, при этом была достигнута наибольшая прочность агломерата 73%, однако выход годного по стандартно стабилизированному агломерату превысил аналогичный показатель в базовом спекании лишь на 1% абс. В данном спекании также выход возврата из аглоспека после стабилизации  $\varphi'_{cm} = 0,421$  д. ед. не обеспечивает замкнутого цикла возврата, так как выход возврата по отношению ко всей массе шихты составляет  $\varphi_{cm} = 0,330$  д. ед., вследствие чего производительность при замкнутом цикле возврата возрастает не столь существенно – на 35,9% по сравнению с приростом 94-106% по другим показателям производительности. В меньшей мере также возрастает производительность по сырой шихте – на 54,6%.

Газопроницаемость и устойчивость структуры окомкованной шихты, а, следовательно, производительность агломерационного процесса зависят не только от количества возврата, но и от его крупности. Лучше всего комкует шихту возврат крупностью 3-6 мм [7]. Замена в шихте базового спекания обычного возврата крупным (калиброванным) фракции 3-5 мм способствовала практически равному повышению производительности аглопроцесса по шихте с возвратом, сырой шихте, аглоспеку на 22%. Длительность спекания снизилась по сравнению с базовым спеканием на 3 минуты (рис. 4, кривые 5 и 6). Прирост производительности по выходу годного составил 20,7 и стандартно стабилизированного агломерата – 24,5%, а при замкнутом цикле возврата – 22,7%. Положительный прирост производительности по всем расчетным показателям свидетельствует об объективном ее повышении при замене обычного возврата калиброванным. Прочность агломерата в рассматриваемом случае несколько возросла, так как, несмотря на сокращение на 1% абс. выхода годного из аглоспека, повысилась прочность агломерата более чем на 2% абс., а выход стандартно стабилизированного агломерата соответственно – на 1,85% отн. При этом выход первичного возврата по отношению к массе шихты  $\varphi = 14,6\%$  ниже его исходного количества в шихте, а калиброванного возврата всего 5,7%. После стабилизации агломерата в стандартном барабане  $\varphi$  возрастает до 33,6%, что позволяет за счет предварительного гранулирования мелкого возврата [15] создать замкнутый цикл крупного возврата на аглофабрике при отгрузке продукта повышенной прочности.

В производственных условиях, как отмечалось выше, производительность аглофабрики



оценивается по количеству отгруженного годного агломерата с учетом установившегося баланса возврата. Согласно справочным данным [1] удельная производительность агломашин Абагурской фабрики № 1 составляла  $1,08 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  годного агломерата, содержащего  $P_{-5}^A = 15,2\%$  мелкой фракции, для фабрики № 2 –  $0,96 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  агломерата с  $P_{-5}^A = 10,4\%$ , для аглофабрики КачГОК –  $0,92 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  агломерата с  $P_{-5}^A = 9,5\%$ , соответственно. Расчетная производительность по «идеальному агломерату» для данных аглофабрик составила  $0,916$ ;  $0,860$ ;  $0,833 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$ , соответственно [11].

Оценка производительности аглопроцесса с учетом полного отсева вторичного возврата, т. е. с учетом содержания мелочи в агломерате  $P_{-5}^D$  под бункерами доменного цеха, привела к снижению удельной производительности соответствующих аглофабрик до  $0,862$ ;  $0,812$ ;  $0,799 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$ . Для прогнозной оценки удельной производительности агломашин при производстве стабилизированного агломерата целесообразно рассчитывать удельную производительность по стандартно стабилизированному агломерату  $Q_{st}^{ycm} = X \cdot Q_{uo}$ , т. е. с учетом прочности годного продукта, составляющей для рассматриваемых аглофабрик  $53,5$ ;  $72,3$  и  $70,3\%$ , соответственно. Наибольшая удельная производительность по стабилизированному агломерату  $0,622 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  наблюдалась на Абагурской фабрике № 2, производящей наиболее прочный агломерат, а наименьшая  $0,490 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  – на Абагурской фабрике № 1 с наименее прочным продуктом. Аглофабрика ММК им. Ильича производила  $1,313$  (2008 г.) и  $1,496 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  (2007 г.) годного агломерата, при этом производительность по идеальному агломерату составляла  $1,130$  и  $1,291$ , фактическая производительность с учетом суммарного возврата, равная  $1,207$  и  $1,384$ , превысила  $Q_{uo}$  вследствие неполного отсева мелкой фракции из агломерата перед доменными печами, а расчетная производительность по выходу стандартно стабилизированного агломерата являлась минимальной –  $0,729$  и  $0,847 \text{ т/м}^2 \cdot \text{ч}$  соответственно.

### Выводы

1. В лабораторных условиях наиболее объективной является сравнительная оценка производительности аглопроцесса по сырой шихте и выходу годного агломерата при замкнутом сбалансированном цикле возврата постоянной крупности.
2. В производственных условиях сравнительную оценку удельной производительности аглопроцесса целесообразно проводить с учетом суммарного выхода возврата либо прочности агломерата.
3. В дальнейших исследованиях необходимо проанализировать возможности управления режимом возврата путем предварительного гранулирования его мелких фракций.

### Список использованных источников:

1. Подготовка руд и доменный процесс / И.Д. Баллон [и др.]. – М. : Металлургия, 1989. – 496 с. – (Доменное производство : справочное издание : в 2-х т.; Т. 1).
2. Шаповалов М.А. Техническая эффективность рассортировки доменной шихты по крупности / М.А. Шаповалов // Сталь. – 1958. – № 9. – С. 780-781.
3. Еремеева К.Н. Агломерация руд за рубежом / К.Н. Еремеева // Бюллетень ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии. – 1973. – № 12. – С. 3-13.
4. Исследование процесса разрушения агломерата / С.В. Базилевич [и др.] // Сталь. – 1968. – № 3. – С. 196-198.
5. Базилевич С.В. Агломерация / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М. : Металлургия, 1967. – 368 с.
6. Базилевич С.В. Исследование режима возврата / С.В. Базилевич, Е.А. Пахомов // Сталь. – 1964. – № 2. – С. 108-111.
7. Коротич В.И. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский // Научное издание. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
8. Задачник з теорії процесів підготовки сировини до доменної плавки : навчальний посібник / В.Б. Семакова [та ін.]. – Маріуполь : ПДТУ, 2012. – 105 с.

9. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов [и др.]. – Киев : Техника, 1983. – 110 с.
10. Сортировка минерального сырья и шихт на вибрационных грохотах / А.Д. Учитель [и др.]. – Дніпропетровськ : Пороги, 1998. – 194 с.
11. Савельев С.Г. Показатели интенсивности агломерационного процесса / С.Г. Савельев, В.А. Шаповалов // Вісник Криворізького технічного університету. – 2008. – Вип. 21. – С. 78-82.
12. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М. : Metallurgiya, 1974. – 288 с.
13. Качество агломерата и возврата на различных стадиях обработки спека / Г.В. Коршиков [и др.] // Сталь. – 1988. – № 12. – С. 6-12.
14. Возможности совершенствования оценки прочностных характеристик агломерата / В.Б. Семакова [и др.] // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 12-15.
15. Пилогин Е.И. Сопоставление способов подготовки и использования мелкого возврата агломерационного производства / Е.И. Пилогин, В.В. Ожогин, В.Б. Семакова // Металл и литье Украины. – 2015. – № 1. – С. 33-37.

**Bibliography:**

1. Preparation of ores and blast furnace process / I.D. Ballon [et al]. – Moscow : Metallurgy, 1989. – 496 p. – (Blast furnace production : certificate edition : in 2 v.; V. 1.) (Rus.)
2. Schapovalov M.A. Technical efficiency of blast furnace charge sorting on size / M.A. Schapovalov // Steel. – 1958. – № 9. – P. 780-781 (Rus.)
3. Eremeeva K.N. Agglomeration of ores abroad / K.N. Eremeeva // Bulletin CSRI of information and technical and economic researches of ferrous metallurgy. – 1973. – № 12. – P. 3-13 (Rus.)
4. Research of sinter destruction process / S.V. Bazilevich [et al] // Steel. – 1968. – № 3. – P. 196-198 (Rus.)
5. Bazilevich S.V. Agglomeration / S.V. Bazilevich, E.F. Vegman. – Moscow : Metallurgiya, 1967. – 368 p. (Rus.)
6. Bazilevich S.V. Study of recycled sinter fines regime / S.V. Bazilevich, E.A. Pakhomov // Steel. – 1964. – V. 2. – P. 108-111 (Rus.)
7. Korotych V.I. Agglomeration of ore materials / V.I. Korotych, Y.A. Frolov, G.N. Bezdezhsky // Scientific edition. – Ekaterinburg : SEE HPE «UGTU-UPI», 2003. – 400 p. (Rus.)
8. Book of tasks from the theory of preparation processes of raw material to the blast furnace melting : train aid / V.B. Semakova [et al]. – Mariupol : PSTU, 2012. – 105 p. (Ukr.)
9. Perfection of sintering process / F.F. Kolesanov [et al]. – Kiev : Tekhnika, 1983. – 110 p. (Rus.)
10. Sorting of mineral raw material and charge on vibration mechanical screening / A.D. Uchitel [et al]. – Dnepropetrovsk : Porogi, 1998. – 194 p. (Rus.)
11. Saveliev S.G. Indexes of sintering process intensity / S.G. Saveliev, V.A. Schapovalov // Bulletin KTU. – 2008. – V. 21. – P. 78-82. (Rus.)
12. Vegman E.F. Theory and technology of sintering / E.F. Vegman. – Moscow : Metallurgiya, 1974. – 288 p. (Rus.)
13. Quality of sinter and return on different stages of sinter processing / G.V. Korshikov [et al] // Steel. – 1988. – V. 12. – P. 6-12 (Rus.)
14. Methods to improve estimation of sinter strength characteristics / V.B. Semakova [et al] // Metallurgical and mining industry. – 2010. – № 6. – P. 12-15. (Rus.)
15. Pilyugin E.I. Comparison of preparation ways and use of small recycled material of sintering production / E.I. Pilyugin, V.V. Ozhogin, V.B. Semakova // Metal and casting of Ukraine. – 2015. – № 1. – P. 33-37. (Rus.)

Рецензент: В.П. Тарасов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 16.03.2015