

Пантелеев Владислав Викторович

Аспирант,
Уральский федеральный университет
(Екатеринбург, Россия)
ORCID 0000-0002-6286-3317
E-mail: vpanteleev@urfu.ru

Panteleev Vladislav Victorovich

Postgraduate student,
Ural Federal University
(Ekaterinburg, Russia)
ORCID 0000-0002-6286-3317
E-mail: vpanteleev@urfu.ru

Половец Михаил Вячеславович

Студент,
Уральский федеральный университет
(Екатеринбург, Россия)
ORCID 0000-0001-8059-925X
E-mail: mvpolovets@urfu.ru

Polovets Mikhail Viacheslavovich

Student,
Ural Federal University
(Ekaterinburg, Russia)
ORCID 0000-0001-8059-925X
E-mail: mvpolovets@urfu.ru

Загайнов Сергей Александрович

Доктор технических наук, профессор,
Уральский федеральный университет
(Екатеринбург, Россия)
E-mail: zagainovski@mail.ru

Zagainov Sergei Aleksandrovich

Doctor of Technology, Professor,
Ural Federal University
(Ekaterinburg, Russia)
E-mail: zagainovski@mail.ru

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА
КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГОРНА
ПЕЧИ**

**DEVELOPING ALGORITHM FOR
MONITORING THE STATE OF THE
FURNACE HEARTH**

Аннотация. Целью исследования является разработка методов контроля состояния горна печи на основе теоретического анализа факторов, определяющих неравномерность выпуска продуктов плавки, и оценка влияния нестабильности отношения массы шлака к массе чугуна на выпуск на показатели работы печей. На основании теоретического анализа выявлено существенное влияние вязкости шлака на выпуск продуктов плавки. Результаты проведенного анализа подтверждаются промышленными данными. Разработан алгоритм оценки состояния горна доменной печи. Сделан вывод, что отношение массы шлака к массе чугуна на выпуске определяется длиной и диаметром летки.

Ключевые слова: выпуск, жидкие продукты плавки, горн, чугун, шлак, летка, вязкость шлака, производительность печи

Abstract. The objective of the research is to develop methods for the state monitoring of the furnace hearth based on a theoretical analysis of factors that determine the unevenness of smelting products tapping; and assess the effect of the instability of the slag mass to the pig iron mass ratio at tapping on furnace performance. Based on theoretical analysis, a significant effect of slag viscosity on smelting products tapping was revealed. Theoretical analysis results are confirmed by industry data. An algorithm for assessing the state of a blast furnace hearth has been developed. It is shown that the ratio of slag mass to the mass of pig iron at the tapping is determined by the length and diameter of the tap hole.

Keywords: tapping, melting liquid products, hearth, pig iron, slag, tap hole, slag viscosity, furnace production

Введение

Известно, что условием стабильного развития физико-химических процессов в горне печи, а следовательно, и эффективности доменной плавки является постоянное на каждом выпуске отношение массы шлака к массе чугуна.

В условиях работы доменных печей наблюдаются существенные колебания отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске. Например, на доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» стандартное отклонение этих величин в отдельные периоды достигает 0,28 при среднем значении 0,35 тонн на тонну чугуна.

Целью исследования является разработка методов контроля состояния горна печи на основе теоретического анализа факторов, определяющих неравномерность выпуска продуктов плавки, и оценка влияния нестабильности отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске на показатели работы печей.

Основная часть

Теоретический анализ

Скорость потока продуктов плавки зависит от физических свойств расплавов. Суммарный перепад давления (потери давления) при движении продуктов плавки в канале летки и на входе в летку для чугуна и шлака одинаков.

Потери напора на трение при движении расплава в канале летки определяются по уравнению¹:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

где v – скорость, м/с; l – длина летки, м; d – эквивалентный диаметр канала, м; ρ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент сопротивления, который определяется по эмпирическому уравнению и зависит от числа Рейнольдса (Re):

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2)$$

Число Рейнольдса зависит от диаметра канала (d), скорости потока (v) и вязкости жидкости ϑ и рассчитывается по уравнению (3):

$$Re = \frac{d \cdot v}{\vartheta}. \quad (3)$$

Здесь ϑ – кинематическая вязкость, м²/с.

Подставляя уравнения (2) и (3) в уравнение (1), получаем выражение:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \frac{64 \cdot \vartheta \cdot \rho \cdot v \cdot l}{d^2 \cdot 2}. \quad (4)$$

Потери напора на местное сопротивление – вхождение расплавов из горна печи в канал чугунной летки $\Delta P_{\text{вх}}$ определяется по уравнению:

¹ Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г., Гордон Я. М. и др. Механика жидкости и газа. – Москва: Академкнига, 2003. – 464 с.

$$\Delta P_{\text{вх}} = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (5)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления (зависит от конфигурации входного канала)¹.

Суммарные потери давления как для чугуна, так и для шлака определяются как сумма $\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{вх}}$. С учетом зависимости λ от Re получим:

$$\Delta P = \frac{64 \cdot \rho \cdot v \cdot l}{d^2 \cdot 2} + \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}. \quad (6)$$

При выполнении расчетов используются справочные данные о физических свойствах чугуна и шлака². Следует отметить, что при более высокой скорости движения металлического расплава чугун испытывает сопротивление трением не только о стенки летки, но и со стороны покрывающего его шлака, что вносит определенную погрешность в выполненные расчеты.

В результате решения уравнения (6) с учетом доли сечения, занятого различными фазами, были рассчитаны относительные потери давления при разной вязкости шлака. При этом точка пересечения кривых для чугуна и шлака определяет долю сечения летки, занятого расплавами при истечении. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

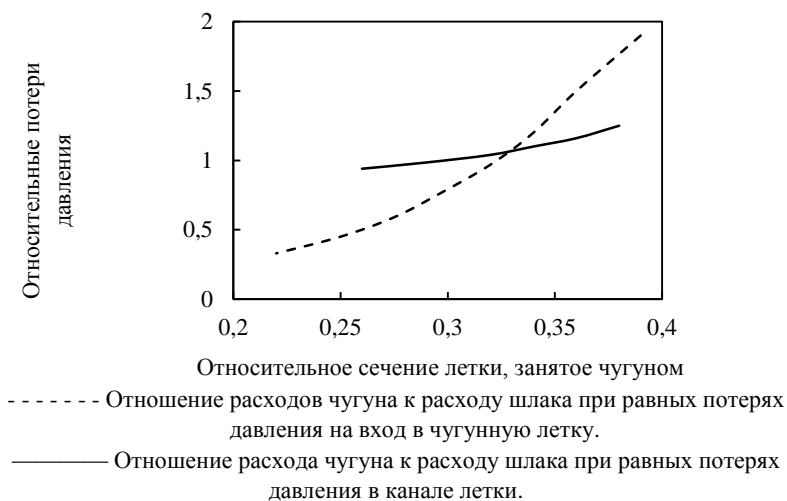


Рис. 1. Результаты расчета при вязкости шлака 0,25 Па·с

¹ Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – Москва: Альянс, 2010. – 423 с.

² Балон И. Д. Доменное производство: в 2 т. – Москва: Металлургия, 1989. – Т. 1. – 491 с. ISBN 5–229–00055–4: 2.20.

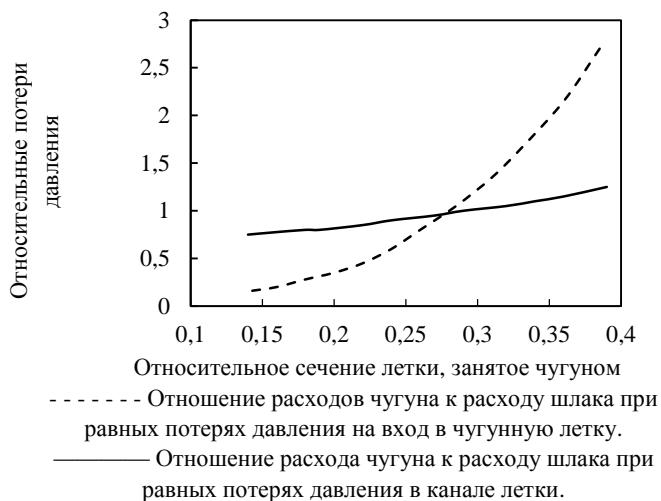


Рис. 2. Результаты расчета при вязкости шлака 0,35 Па·с

Полученные зависимости показывают, что равенство потерь давления на входе в канал чугунной летки и трение зависят от вязкости шлака. Увеличение последней приводит к снижению доли сечения, занятой чугуном, и, соответственно, увеличивает отношение количества шлака и чугуна в продуктах. В то же время чем выше вязкость шлака, тем меньше скорость его движения по летке и ниже выход шлака при выпуске.

При моделировании оценивалось влияние вязкости шлака, диаметра и длины летки на долю сечения, занятого чугуном.

Зависимость доли сечения летки, занятой чугуном, от вязкости шлака приводится на рис. 3.

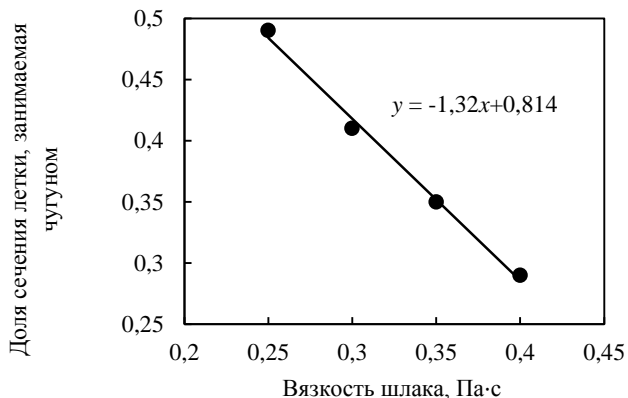


Рис. 3. Зависимость доли сечения летки, занятой чугуном, от вязкости шлака

При увеличении вязкости шлака доля чугуна, находящаяся в канале чугунной летки, а следовательно, и скорость движения чугуна снижается. Это в полной мере объясняет снижение скорости налива ковшей чугуна после появления шлака в канале летки.

В результате анализа влияния диаметра и длины чугунной летки на долю сечения, занятого чугуном, установлено, что влияние диаметра летки на характер выпуска (см. рис. 4) проявляется в большей степени.

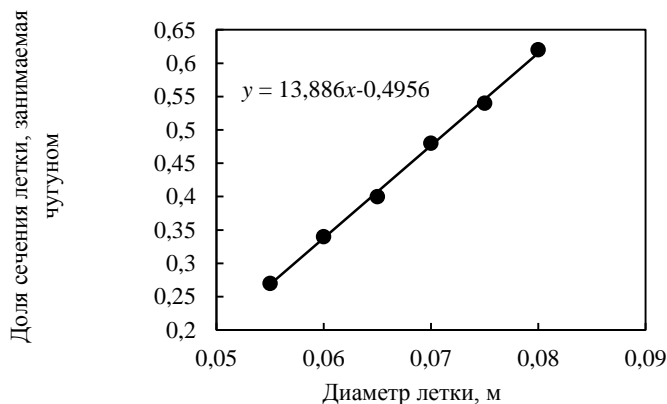


Рис. 4. Зависимость доли сечения летки, занятой чугуном, от диаметра летки

Зависимость доли сечения летки, занятой чугуном, от длины летки представлена на рис. 5. Увеличение длины чугунной летки сопровождается снижением доли чугуна в ее канале. С увеличением длины летки на 10 % доля ее сечения, занятая чугуном, снижается на 5,14 %.

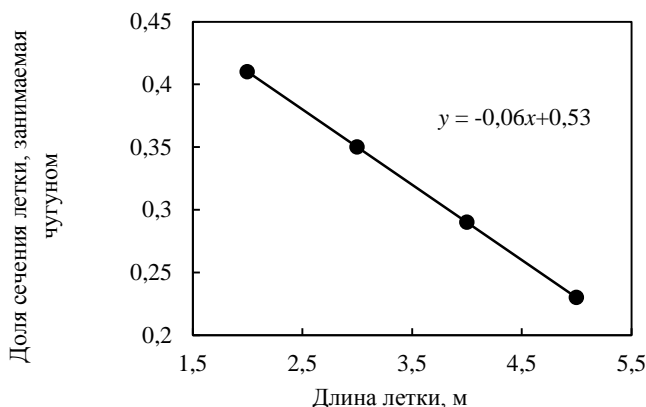


Рис. 5. Зависимость доли сечения летки, занятой чугуном, от диаметра летки

Результаты теоретического анализа подтвердили тот факт, что основным условием стабильного характера выпуска является постоянство свойств шлака, постоянство длины и диаметра чугунной летки, что во многом обеспечивается качеством леточной массы.

Проверка результатов моделирования

Проверка правомерности вывода о влиянии вязкости шлака на характер выпуска продуктов плавки осуществлялась с использованием данных о массах чугуна и шлака, их температуре и химическом составе более чем 4000 выпусков на доменных пе-

чах АО «ЕВРАЗ НТМК». Был применен метод группировки¹. Данные выстраивались в вариационный ряд по одному из признаков, и находились средние значения в выбранных интервалах. Средние значения переменных в каждом интервале группировки имели статистически значимое отличие, которое оценивалось с использованием критерия Стьюдента.

В реальном диапазоне изменения химического состава шлака основным фактором, определяющим его вязкость, является температура, которая связана с температурой чугуна². Факт влияния температуры, а следовательно, и вязкости на отношение массы шлака к массе чугуна подтверждается зависимостью, которая представлена на рис. 6.

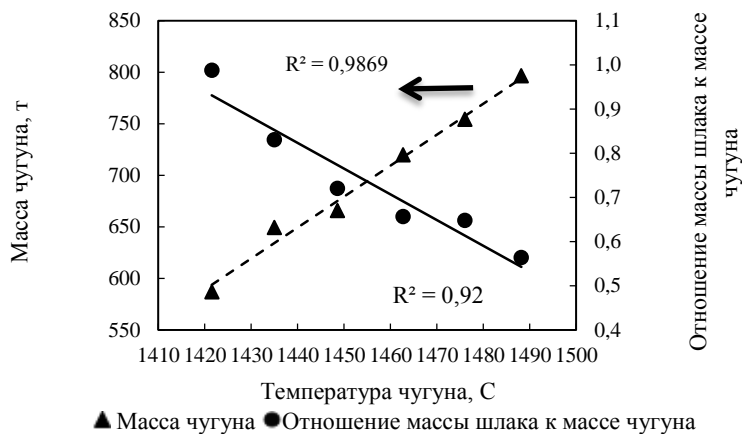


Рис. 6. Влияние температуры чугуна на отношение массы шлака к массе чугуна и на массу чугуна

Разработка алгоритма контроля состояния горна печи

Изменение отношения массы шлака к массе чугуна, выпущенного из печи, зависит как от вязкости шлака, так и от состояния горна. При этом эффективная вязкость шлака обуславливается содержанием твердых частиц и рассчитывается по уравнению:

$$\eta_{\text{эф}} = \eta \cdot (1 + 2,5 \cdot \alpha_{\text{тв}}),$$

где $\eta_{\text{эф}}$ – эффективная (кажущаяся) вязкость, Па·с; $\alpha_{\text{тв}}$ – объемная доля твердых частиц, %.

Если на выпуске шлак не полностью удален из печи, то уровень расплава в горне увеличивается, что приводит к замедлению схода шихты и потере производительности печи. На следующем выпуске количество шлака, удаленного из печи, возрастает,

¹ Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=458351> (дата обращения: 13.01.2020).

² Дукарский С. М. Термометрия продуктов доменной плавки. – Москва: Металлургия, 1976. – 120 с.

что сопровождается снижением массы выпущенного чугуна. Зависимость массы выпущенного чугуна от массы выпущенного шлака приводится на рис. 7.

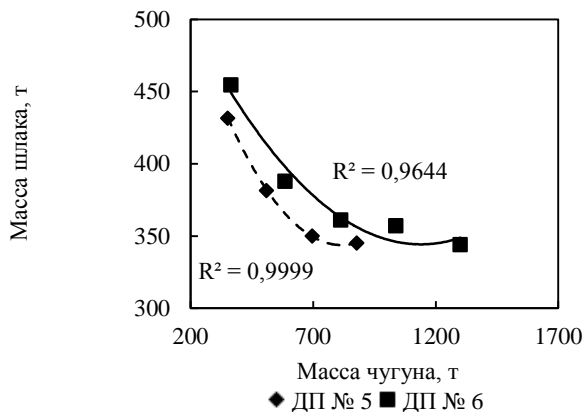


Рис. 7. Взаимосвязь массы шлака и массы чугуна на выпуске

Влияние колебаний отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске воздействует на суточное производство чугуна. Для оценки этого влияния суммарное количество чугуна, выпущенное из печи за сутки, сравнивалось со среднеквадратическим отклонением отношения массы шлака к массе чугуна за сутки. Полученная зависимость приведена на рис. 8. Влияние нестабильности выпусков продуктов плавки в большей степени проявляется на доменной печи № 5, которая работает с более высокой интенсивностью.

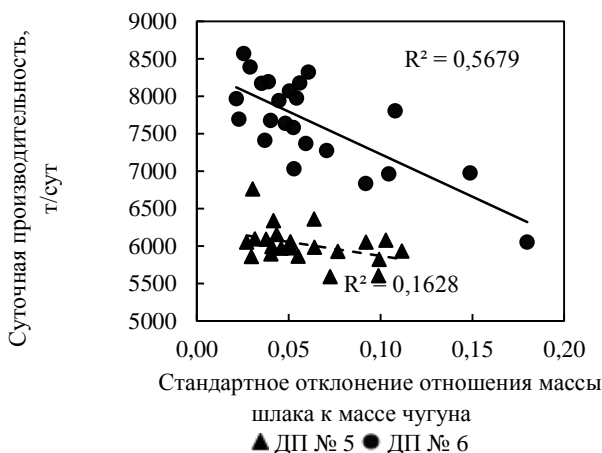


Рис. 8. Зависимость суточной производительности от среднеквадратического отклонения отношения массы шлака к массе чугуна

Приведенные зависимости позволяют говорить о том, что повышение нестабильности выпуска продуктов плавки приводит к снижению производительности доменных печей, которое наблюдается при значении среднеквадратичного отклонения выше 0,05.

Контроль состояния горна

По данным отношения массы шлака к массе чугуна рассчитывается стандартное отклонение по 4 выпускам. В тех случаях, когда значение выше 0,05, средняя за 4 выпуска вязкость шлака¹ рассчитывается по математической модели, оценивается изменение температуры чугуна.

Пример изменения стандартного отклонения отношения массы шлака к массе чугуна представлен на рис. 9.

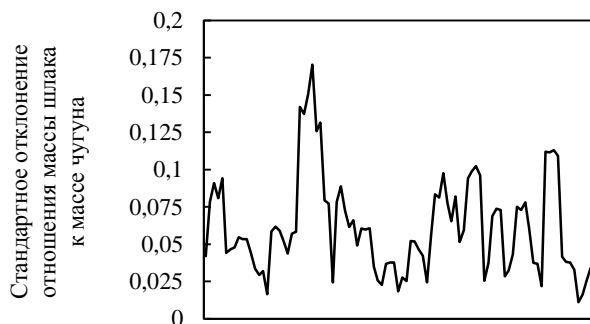


Рис. 9. Динамика изменения стандартного отклонения отношения массы шлака к массе чугуна

Текущие значения температуры и вязкости сравниваются с данными о работе печей.

В тех случаях, когда температура чугуна оказывается ниже предыдущей на 10 °С, выдается рекомендация о повышении теплового состояния печи.

Если вязкость шлака отличается более чем на 0,01, то даются рекомендации по повышению основности шлака или содержания в нем MgO.

Если температура и вязкость находятся в допустимых пределах, то дается рекомендация на промывку горна печи.

Выводы

На основе теоретических представлений выявлено существенное влияние вязкости шлака на характер выпуска продуктов плавки. Установлено, что повышенные колебания отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске приводят к снижению производительности печи. Данные факты позволили разработать алгоритм контроля горна печи.

Литература

Балон И. Д. Доменное производство: в 2 т. – Москва: Металлургия, 1989. – Т. 1. – 491 с. ISBN 5–229–00055–4: 2.20.

Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. – Москва: Альянс, 2010. – 423 с.

¹ Сухарева С. П., Гилева Л. Ю., Загайнов С. А. Разработка блока анализа и прогноза шлакового режима доменной плавки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 3. – С. 75–76.

Дукарский С. М. Термометрия продуктов доменной плавки. – Москва: Metallurgiya, 1976. – 120 с.

Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=458351> (дата обращения: 13.01.2020).

Сухарева С. П., Гилева Л. Ю., Загайнов С. А. Разработка блока анализа и прогноза шлакового режима доменной плавки // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 3. – С. 75–76.

Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г., Гордон Я. М. и др. Механика жидкости и газа. – Москва: Академкнига, 2003. – 464 с.

References

Balon I. D. *Domennoe proizvodstvo: v 2 t.* [Blast furnace production: in 2 volumes]. Moscow: Metallurgiya, 1989, vol. 1. 491 p.

Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. i dr. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow: Al'ians, 2010. 423 p.

Dukarskii S. M. *Termometriia produktov domЕННОI pлавки* [Thermometry of blast furnace products]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 120 p.

Mitropol'skii A. K. *Tekhnika statisticheskikh vychislenii* [Statistical computing technique]. Available at: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=458351> (accessed: 13.01.2020).

Sukhareva S. P., Gileva L. Iu., Zagainov S. A. Razrabotka bloka analiza i prognoza shlakovogo rezhima domЕННОI pлавки [Development of a blast furnace slag analysis and forecast block]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2004, no. 3, pp. 75–76.

Shvydkii V. S., Iaroshenko Iu. G., Gordon Ia. M. i dr. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow: Akademkniga, 2003. 464 p.

Для цитирования: Пантелеев В. В., Половец М. В., Загайнов С. А. Разработка алгоритма контроля состояния горна печи // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 2 (95). – С. 26–34. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-2-95-2

For citation: Panteleev V. V., Polovets M. V., Zagainov S. A. Developing algorithm for monitoring the state of the furnace hearth. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 2 (95), pp. 26–34. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-2-95-2