

УДК 622.788.36

Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОКОМКОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»**

**Аннотация.** Представлены результаты эксперимента по исследованию эффективности окомкования в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь», который заключался в отборе проб агломерационной шихты до и после окомкования с последующим определением свойств шихты – гранулометрического состава, влажности и насыпной плотности.

Приведены зависимости и уравнения, иллюстрирующие влияние параметров окомкования агломерационной шихты из руд и концентратов Курской магнитной аномалии на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной агломерационной шихты и ее насыпную плотность. Выявленные зависимости позволяют прогнозировать результаты окомкования по контролируемым входным параметрам компонентов аглошихты (крупность) и влажности аглошихты, регулируемой в процессе подготовки шихты к спеканию.

Полученные уравнения достоверны и пригодны для прогнозирования результатов окомкования агломерационной шихты при спекании руд и концентратов Курской магнитной аномалии в условиях работы агломерационного цеха АО «Уральская сталь».

**Ключевые слова:** окомкование агломерационной шихты, влажность аглошихты, крупность агломерационной шихты, насыпная плотность агломерационной шихты.

**Введение**

В работах [1-3] получена математическая модель расчета удельной производительности агломерационной машины:

$$G = \sqrt{(p/d)^{1+k} \cdot (h\rho)^{1-k}} \cdot \tau^k, \quad (1)$$

где  $G$  – удельная производительность агломашин, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$p$  – общее газодинамическое сопротивление слоя аглошихты, кг/(с<sup>2</sup>·м);

$h$  – высота слоя аглошихты, м;

$\rho$  – насыпная плотность аглошихты, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – крупность спекаемого материала, выраженная через средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты, м;

$\tau$  – продолжительность процесса спекания аглошихты, с;

$k$  – показатель степени.

Для использования модели при прогнозировании производительности агломашин при спекании руд и концентратов Курской магнитной аномалии (КМА) в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь» необходимо определить средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность по исходному гранулометрическому составу шихты (перед окомкованием) и режиму окомкования.

Согласно данным исследования [4] результаты окомкования в барабанных грануляторах определяют следующие конструктивные и технологические параметры: диаметр, длину и угол наклона барабана; скорость вращения барабана; режим увлажнения шихты в барабане; степень заполнения барабана шихтой;

нагрузку на окомкователь и продолжительность обработки шихты в барабане.

В аглоцехе АО «Уральская сталь» для окомкования шихты используют цилиндрические барабаны диаметром 2,8 м, длиной 6 м, с углом наклона 1°30'. Скорость вращения барабана составляет 6 об/мин, а подача воды осуществляется в первой трети окомкователя струйным распылением.

Ранее рядом исследователей изучалось изменение гранулометрического состава продукта в зависимости от параметров гранулирования материалов в барабанных окомкователях: гранулометрического состава исходной шихты и ее насыпной плотности, режимов увлажнения и окомкования шихты [5-14]. Предлагаемые исследователями уравнения применимы лишь при принятых механизмах гранулирования и имеют частный характер, что ограничивает их использование в производственных условиях, в частности в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь».

Проанализировав работы [5-14], приняв конструктивные и технологические параметры работы вращающегося цилиндрического барабана-окомкователя в аглоцехе АО «Уральская сталь» постоянными (кроме режима увлажнения шихты – влажности шихты перед окомкованием и после окомкования), предположили, что в качестве исходных данных для прогнозирования результатов окомкования (при постоянных компонентном составе исходной шихты и температуре шихты при грануляции) можно использовать: гранулометрический состав шихты перед окомкованием; влажность шихты перед окомкованием и после окомкования; насыпную плотность шихты перед окомкованием.

**Цель работы:** исследование эффективности окомкования в условиях агломерационного цеха АО «Уральская сталь» и получение достоверных зависимостей, позволяющих прогнозировать результаты окомкования по контролируемым входным параметрам.

© Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н., 2020

## Методы исследования

Для изучения влияния указанных параметров на результаты окомкования в июне-октябре 2014 г. в аглоцехе АО «Уральская сталь» был проведен эксперимент, заключающийся в отборе проб шихты и исследовании ее параметров перед окомкованием и после окомкования. Во время отбора проб фиксировался текущий состав шихты, а пробы шихты исследовались на гранулометрический состав, влажность и насыпную плотность.

## Результаты исследования и их обсуждение

Условия и результаты исследования шихты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расход шихтовых материалов на 1 т агломерата

Материалы	Расход, кг/т*
Аглоруда Бакальского рудоуправления	$\frac{89,93 \div 139,35}{115,89}$
Аглоруда Михайловского ГОКа	$\frac{139,59 \div 157,93}{150,65}$
Концентрат Михайловского ГОКа	$\frac{581,22 \div 642,23}{606,95}$
Шлам	$\frac{20,23 \div 20,31}{20,26}$
Отсев агломерата и окатышей	$\frac{33,01 \div 53,95}{37,47}$
Мелочь брикетов	$\frac{0 \div 35,85}{27,54}$
Колошниковая пыль	$\frac{14,11 \div 28,58}{23,49}$
Окалина	$\frac{3,70 \div 7,36}{5,87}$
Доменный присад	$\frac{1,43 \div 5,64}{4,74}$
ИТОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ	$\frac{971,50 \div 1013,59}{993,13}$
Известняк	$\frac{162,81 \div 208,83}{178,58}$
Известь	$\frac{24,15 \div 30,00}{28,50}$
Твердое топливо	$\frac{41,18 \div 42,44}{41,87}$

\*В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 2

Параметры аглошихты до и после окомкования

Параметры аглошихты		Значение*
Влажность аглошихты перед окомкованием, %		$\frac{2,25 \div 4,93}{3,86}$
Гранулометрический состав шихты перед окомкованием, %	+ 10 мм	$\frac{2,85 \div 7,16}{4,70}$
	5 - 10 мм	$\frac{3,96 \div 9,50}{6,94}$
	3 - 5 мм	$\frac{4,29 \div 10,11}{7,62}$
	1 - 3 мм	$\frac{18,73 \div 27,81}{22,54}$
	0 - 1 мм	$\frac{52,43 \div 65,85}{58,06}$
Средний эквивалентный диаметр гранул шихты перед окомкованием, мм**		$\frac{1,69 \div 2,53}{2,15}$
Насыпная плотность шихты перед окомкованием, кг/м <sup>3</sup>		$\frac{1554,00 \div 1792,00}{1652,09}$
Влажность окомкованной аглошихты, %		$\frac{7,30 \div 9,23}{8,14}$
Гранулометрический состав окомкованной аглошихты, %	+ 10 мм	$\frac{7,85 \div 16,18}{11,11}$
	5 - 10 мм	$\frac{10,18 \div 19,90}{14,32}$
	3 - 5 мм	$\frac{14,46 \div 26,79}{19,34}$
	1 - 3 мм	$\frac{29,92 \div 51,07}{38,07}$
	0 - 1 мм	$\frac{6,61 \div 29,25}{16,78}$
Средний эквивалентный диаметр окомкованной аглошихты, мм **		$\frac{3,34 \div 4,97}{4,08}$
Насыпная плотность окомкованной аглошихты, кг/м <sup>3</sup>		$\frac{1658,20 \div 1816,30}{1735,40}$

\*В числителе – интервал изменения, в знаменателе – среднее значение.

$$**\text{Рассчитан по формуле [6]: } d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i}{d_{cp}}\right)_i}, \text{ мм}$$

где  $p_i$  – выход класса  $i$ , %;  $(d_{cp})_i$  – средний диаметр класса  $i$ , мм;  $n$  – количество классов.

Незначительные колебания компонентного со-

става аглошихты в период исследования позволили сделать вывод об идентичных условиях проведения эксперимента, где результаты окомкования определяются в первую очередь расходом воды на увлажнение и крупностью исходной шихты.

По полученным данным были построены графики, иллюстрирующие влияние параметров окомкования на его результаты: средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность.

На рис. 1 приведена зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от среднего эквивалентного диаметра гранул аглошихты перед окомкованием, которая носит экстремальный характер. В изученном диапазоне гранулометрического состава исходной шихты с увеличением средней крупности ее гранул до 2,3–2,4 мм наблюдается затухающий рост среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты, что можно объяснить уменьшением содержания в аглошихте комкуемых фракций (0–1 мм). Невысокая величина достоверности линии тренда ( $R^2 = 0,1428$ ,  $r = 0,378$ ) объясняется одновременным влиянием влажности на среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты. Однако для анализируемого объема выборки с вероятностью 90 % полученная зависи-

мость статистически значима.

На рис. 2 показано влияние влажности на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты. Трендовая линия зависимости среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от содержания в ней влаги имеет выпуклый характер с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,533$  и коэффициентом корреляции  $r = 0,73$ . При увеличении содержания влаги с 7,30 до 9,23% трендовая линия отражает увеличение среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты, что обусловлено ростом сил капиллярного и молекулярного сцепления. При этом с ростом содержания влаги наблюдается снижение ее влияния на средний диаметр гранул, что объясняется достижением предельной влажности аглошихты (при ее текущем гранулометрическом составе) и уменьшением неокомкованной части шихты. Дальнейшее увлажнение аглошихты приводит только к ее переокомкованию за счет слипания сформированных гранул. Достаточно высокое значение величины достоверности аппроксимации линии тренда свидетельствует о доминирующем влиянии влажности на результаты окомкования в исследуемых условиях.

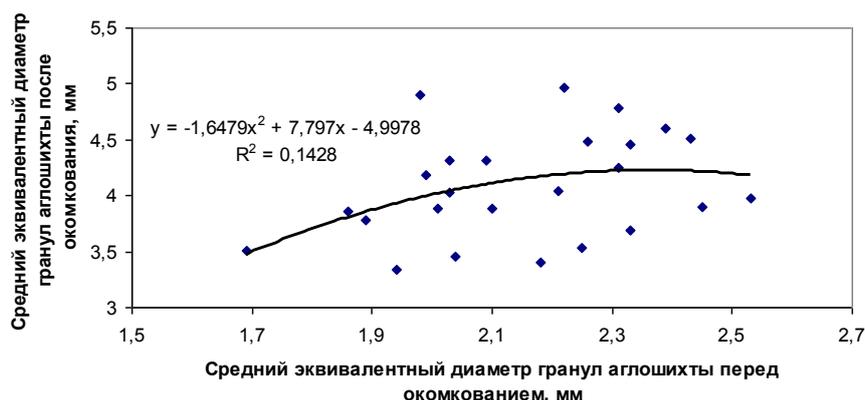


Рис. 1. Зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от эквивалентного диаметра гранул аглошихты перед окомкованием

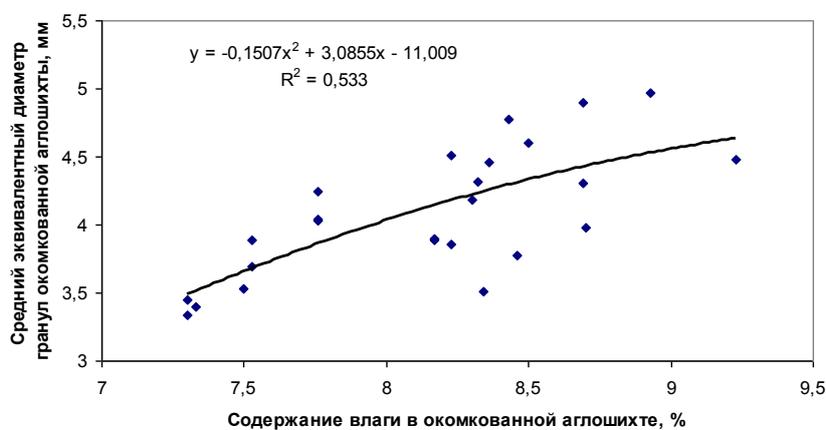


Рис. 2. Зависимость среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от содержания влаги в окомкованной аглошихте

Для количественной оценки совместного влияния влажности шихты и granulометрического состава исходной шихты на средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты выполнен множественный регрессионный анализ и получено уравнение регрессии:

$$d_o = -2,083 + 0,5613 \cdot d_n + 0,6088 \cdot w_o, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,5848, R = 0,7647,$$

где  $d_o$  – средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты, мм;

$d_n$  – средний эквивалентный диаметр гранул шихты перед окомкованием, мм;

$w_o$  – влажность окомкованной аглошихты, %.

Взаимный учет влияния двух факторов с использованием линейной модели позволяет с более высокой степенью достоверности прогнозировать среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты для исследованных условий:  $R^2 = 0,5848$  превышает значения величин достоверности аппроксимации, полученных при анализе частных зависимостей (см. рис. 1, 2).

Усложнение регрессионной модели позволяет получить зависимость средней крупности гранул окомкованной аглошихты от исследуемых параметров с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,7546$  и множественным коэффициентом корреляции  $R = 0,8687$  :

$$d_o = -44,04 + 16,21 \cdot d_n + 6,819 \cdot w_o - 4,191 \cdot d_n^2 - 0,4129 \cdot w_o^2 + 0,2733 \cdot d_n \cdot w_o. \quad (3)$$

Другим значимым результатом окомкования, влияющим на газопроницаемость спекаемого слоя и производительность агломашины, является насыпная плотность аглошихты. На рис. 3 показано влияние влажности окомкованной аглошихты на ее насыпную плотность. Трендовая линия зависимости насыпной плотности окомкованной аглошихты от ее влажности имеет вогнутый характер с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,5407$  и коэффициентом корреляции  $r = 0,735$ . При увеличении влажности окомкованной аглошихты с 7,30 до 9,23 % трендовая линия отражает увеличение насыпной плотности аглошихты. Это объясняется тем, что в исследуемом интервале с ростом влажности, несмотря на увеличение порозности окомкованной аглошихты из-за роста среднего диаметра гранул, увеличивается влагонасыщенность и масса гранул.

На рис. 4 показана взаимосвязь результатов окомкования аглошихты: насыпной плотности и среднего эквивалентного диаметра гранул. Трендовая линия имеет выпуклый характер с коэффициентом достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,4106$  и коэффициентом корреляции  $r = 0,641$ . При увеличении среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты растет ее насыпная плотность, что объясняется взаимным влиянием на исследуемые параметры влажности, granulометрического состава исходной шихты и порозности.

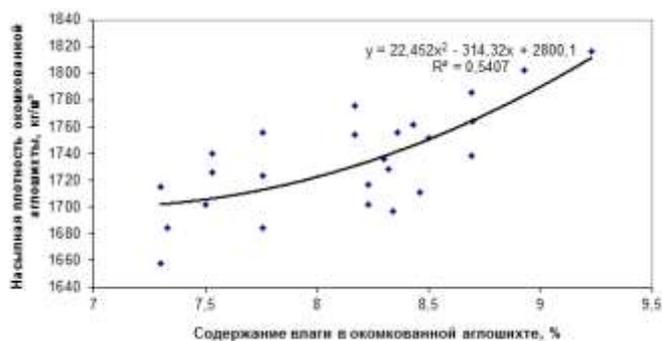


Рис. 3. Зависимость насыпной плотности окомкованной аглошихты от ее влажности

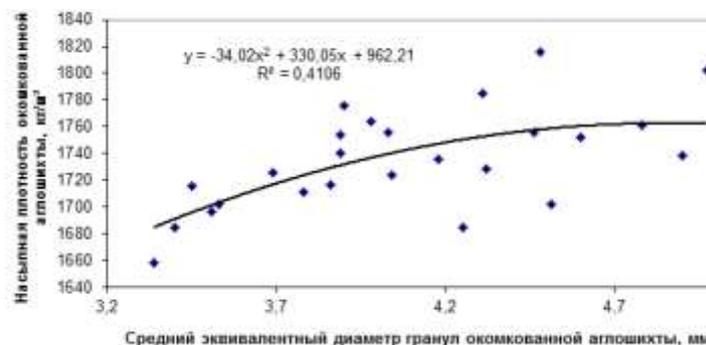


Рис. 4. Зависимость насыпной плотности окомкованной аглошихты от среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты

Для прогнозирования насыпной плотности окомкованной аглошихты наибольшая достоверность получена при использовании ее зависимости от содержания влаги в окомкованной аглошихте.

### Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены зависимости и уравнения, иллюстрирующие влияние параметров окомкования аглошихты из руд и концентратов КМА на его результаты: средний эквивалентный диаметр гранул окомкованной аглошихты и ее насыпную плотность.

2. Взаимный учет влияния среднего эквивалентного диаметра гранул шихты перед окомкованием и содержания влаги в окомкованной аглошихте позволяет с более высокой степенью достоверности прогнозировать среднюю крупность гранул окомкованной аглошихты для исследованных условий, чем частные зависимости среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты от тех же параметров.

3. Получены зависимости насыпной плотности окомкованной аглошихты от содержания влаги в окомкованной аглошихте и среднего эквивалентного диаметра гранул окомкованной аглошихты. Наибольшая достоверность для прогнозирования насыпной плотности окомкованной аглошихты получена при использовании ее зависимости от содержания влаги в окомкованной аглошихте.

4. Полученные зависимости и уравнения пригодны для прогнозирования результатов окомкования аглошихты по контролируемым входным параметрам компонентов аглошихты (крупность) и влажности аглошихты, регулируемой в процессе подготовки шихты к спеканию.

### Список литературы

1. Математическая модель расчёта удельной производительности агломерационной машины / Ганин Д.Р., Паньчев А.А., Дружков В.Г., Шаповалов А.Н. // *Металлург.* 2016. №1. С.14-20.
2. Ганин Д.Р., Паньчев А.А. Новая математическая модель агломерационного процесса // *Металлург.* 2013. № 5. С.44-47.
3. Обзор и анализ математических моделей расчета производительности агломерационной машины / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н. // *Теория и технология металлургического производства.* 2014. №2(15). С. 20-26.
4. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
5. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. Научное издание. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. 400 с.
6. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. М.: Химия, 1991. 240 с.
7. Umadevi T., Deodhar A.V., Kumar S., et al. Influence of coke breeze particle size on quality of sinter. (2008) *Ironmaking & Steelmaking*, 35:8, 567-574.
8. Fan X.H., Li Y., Chen X.L. Study on the Effect on Sintering Mineralization of Iron Ore. (2013) *Advanced Materials Research*. Vols. 652-654, pp. 2538-2542.
9. Шаповалов А.Н., Овчинникова Е.В., Майстренко Н.А. Повышение качества подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская сталь» // *Металлург.* 2015. №3. С.30-36.
10. Трушко В.Л., Утков В.А., Клямко А.С. Повышение газопроницаемости агломерационной шихты с высоким содержанием железорудного концентрата // *Обогащение руд.* 2015. №3(357). С.32-34.
11. Перспективы использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве ОАО «Уральская сталь» / Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Паньчев А.А., Шаповалов А.Н. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2016. Т.14. № 1. С. 34-40.
12. Повышение эффективности процесса агломерации при окомковании шихты с использованием ПАВ / Майстренко Н.А., Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н., Берсенев И.С. // *Сталь.* 2016. №1. С.12-15.
13. Nyembwe A.M., Cromarty R.D., Garbers-Craig A.M. Relationship Between Iron Ore Granulation Mechanisms, Granule Shapes, and Sinter Bed Permeability. (2017) *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 38:6. 388-402.
14. Higuchi T., Takehara K., Hirotsawa T. Influence of Agitating Conditions on Agglomeration and Collapse of Iron Ore Mixture (2018) *ISIJ International*, vol. 58 (2018), no. 11, pp. 2009-2017.

### Сведения об авторах

**Ганин Дмитрий Рудольфович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: dmrgan@mail.ru.

**Дружков Виталий Гаврилович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургии и химических технологий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

**Панычев Анатолий Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

**Шаповалов Алексей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия. E-mail: alshapo@yandex.ru.

---

*INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH*

---

**PREDICTION RESULTS PELLETIZING SINTER BURDEN AT JSC «URAL STEEL»**

**Ganin Dmitriy R.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: [dmrgan@mail.ru](mailto:dmrgan@mail.ru)

**Druzhkov Vitaly G.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Panychev Anatoliy A.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia.

**Shapovalov A.N.** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of the National Research Technological University «MISiS», Novotroitsk, Russia. E-mail: alshapo@yandex.ru

***Abstracts.** The results of an experiment on the study of the efficiency of pelletizing in the conditions of the sintering shop of JSC "Ural Steel" are presented. The experiment consisted in taking samples of the sinter burden before and after pelletizing. Then, were determined the properties of pelletized sinter burden - particle size distribution, moisture content and bulk density.*

*The article describes the dependencies and equations, illustrating the effect of the parameters of the pelletizing sinter burden on average equivalent diameter pellets pelletized sinter burden and its bulk density. The revealed dependences make it possible to predict the results of pelletizing according to the controlled input parameters of the sinter burden components (size) and the sinter burden moisture, which is regulated in the process of preparing the charge for sintering.*

*The obtained equations are reliable and suitable for predicting outcomes pelletizing sinter burden during sintering of ores and concentrates, the Kursk magnetic anomaly in the JSC "Ural Steel".*

***Keywords:** pelletizing the sinter burden, sinter burden moisture, size of the sinter burden, the bulk density of the sinter burden.*

---

Ссылка на статью:

Ганин Д.Р., Дружков В.Г., Панычев А.А., Шаповалов А.Н. Прогнозирование результатов окомкования агломерационной шихты в условиях АО «Уральская Сталь» // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3 (34). С. 8-13.

Ganin D.R., Druzhkov V.G., Panychev A.A., Shapovalov A.N. Prediction results pelletizing sinter burden at JSC «Ural Steel». *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 8-13.