

*Должиков В. В., \*Федотов О. В., Скубыря Н. А.*  
 Донбасский государственный технический университет  
 \*E-mail: fovit2012@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ И АГЛОМЕРАТА

*Проведены статистические исследования результатов работы аглофабрики металлургического комбината с целью обнаружения величины колебаний химического состава аглошихты и агломерата. Обнаружены существенные отклонения от рекомендуемых значений интервалов колебания в содержании железа и основности агломерата. Показано, что установленные колебания химического состава агломерата могут быть изменены при уменьшении колебаний содержания железа в составе шихты.*

**Ключевые слова:** агломерация железных руд, агломерат, агломерационная шихта, качество агломерата, колебания химического состава агломерационной шихты, колебания химического состава агломерата.

Основными факторами, формирующими показатели качества в агломерационном производстве и влияющими на технико-экономические показатели доменного процесса, являются:

- крупность кусков агломерата (ограниченная верхним и нижним пределами) или массовая доля в нем мелочи;

- степень колеблемости агломерата по физико-химическим свойствам, определяемая величиной стандартного отклонения.

Для определения влияния этих факторов на удельный массовый расход кокса и удельную производительность доменной печи предложены линейные и нелинейные регрессионные модели [1].

В. И. Кармазин [2] отмечает, что при колебаниях содержания железа в агломерате больше 1 % резко падает производительность и экономичность работы доменной печи в связи с увеличением расхода кокса. Автором показано в виде нелинейной зависимости влияние колебаний содержания железа в агломерате на производительность доменной печи и в виде линейной зависимости влияние колебаний содержания железа в агломерате на удельный расход кокса.

При работе на усредненном железорудном сырье производительность доменных печей увеличивается на 4–5 %, расход до-

менного кокса снижается на 0,5–4,0 %, расход железорудного материала — на 1,0–1,5 % и флюса — на 6–8 %.

В работе [3] показано, что уменьшение колеблемости содержания железа в агломерате на 0,5 % снижает удельный расход кокса на 1,08 % и повышает производительность печей на 1,5 %.

По данным других исследователей [4, 5] уменьшение отклонений от среднего содержания железа в шихте на 0,5–1,0 % обеспечивает увеличение производительности доменной печи на 2,8 %, снижение расхода кокса на 2,2 %, выхода шлака — на 2,8 %, колебаний содержания кремния в чугуне — на 39 %.

Следует отметить, что техническими требованиями и технологическими инструкциями на металлургических предприятиях СССР регламентировались основные показатели качества агломерата, среди которых были и допустимые колебания химического состава.

Основным способом уменьшения колебаний химического состава агломерата является усреднение химического состава агломерационной шихты. Под усреднением сырья подразумевается выравнивание его качественных показателей во времени. Постоянство свойств компонентов шихты

и степень усреднения в различных технологических операциях можно оценивать посредством количественной обработки анализов разовых проб методами математической статистики.

**Целью** настоящей работы явилось изучение колебаний химических составов аглошихты и агломерата металлургического предприятия и разработка предложений по улучшению качества агломерата.

**Объект исследования** — показатели качества агломерата.

**Предмет исследования** — результаты химических анализов агломерационной шихты и агломерата.

**Задачи** исследования:

- получить статистические оценки усреднения агломерационной шихты и агломерата;
- предложить мероприятия по уменьшению размаха колебаний химического состава агломерата.

Для анализа применяли статистические характеристики, наиболее часто используемые для описания случайных процессов, к которым относится и усреднение. Разность между максимальным и минимальным значениями выборки называется *вариационным размахом*, который определяется по формуле

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (1)$$

где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значения показателя изучаемого процесса, например, содержания железа в агломерационной шихте.

Данная характеристика очень важна, поскольку устанавливает интервал колебаний, однако является недостаточной для оценки степени колеблемости, так как величина показателя вариации зависит от двух крайних показателей.

Более значимым для оценки параметров усредняемого материала является значение среднего арифметического

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  — содержание компонента в разовой пробе, %;  $n$  — количество разовых проб, шт.

Среднее арифметическое за разные периоды времени также не дает полной оценки рассматриваемого процесса, так как по своему статистическому содержанию представляет собой характеристику, которую имела бы каждая единица совокупности, если бы общий итог процесса был распределен равномерно между всеми единицами совокупности. Эта характеристика используется как средство для понимания случайных отклонений изучаемого признака, что позволяет выявить основные тенденции и закономерности изменения изучаемого фактора.

Для определения степени равномерности (или неравномерности) качества материала чаще используется среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

Использование данного критерия для оценки качества усреднения обусловлено следующими соображениями. При большом количестве анализов шихты или ее компонентов число случайных отклонений в большую или меньшую сторону от  $\bar{x}$  какого-либо компонента в общем случае одинаково и подчиняется закону нормального распределения.

Кривая распределения, в зависимости от величины признака  $\sigma$ , может иметь разную кривизну. Таким образом, колеблемость содержания компонента следует оценивать не по абсолютному, а по среднеквадратичному отклонению. Для практических целей обычно принимают допустимое отклонение, равное  $2\sigma$ .

Техническими условиями и стандартами регламентируются пределы колебаний, например, качества аглоруды или шихты по содержанию железа, основности и содержанию железа в агломерате и др. Среднеквадратичные отклонения  $\sigma$  этих показателей могут быть найдены из выражения

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

$$\sigma = \frac{\bar{d}}{t}, \quad (4)$$

где  $\bar{d}$  — допустимые пределы отклонений, %;  $t$  — коэффициент, найденный по таблице распределения Стьюдента для выборок большого размера (табл. 1).

Так, если допустимые отклонения по железу в аглошихте  $\pm 0,5$  с вероятностью 95,5 % случаев, то  $t \approx 2$ , а допустимая величина  $\sigma$  составляет 0,25.

Для исследований были выбраны результаты работы агломерационной фабрики одного из металлургических комбинатов. На предприятии спекали офлюсованный агломерат. Шихта состояла из концентратов и агломерационной руды. В анализ включили показатели химического состава по пробам, взятым через каждые 4 часа работы (около 1300 проб). Расчеты выполнены с использованием программы Statistica.

Статистические характеристики основных показателей состава аглошихты и агломерата за весь период приведены в таблице 2. Обозначения в таблице соответствуют принятым в программе: кол-во — количество обработанных значений показателя; среднее — среднее значение показателя; Minimum, Maximum — соответственно минимальное и максимальное значения показателя; станд. откл. — выборочная оценка стандартного отклонения показателя от среднего.

Таблица 1

Величины коэффициента вероятности

$t$	Вероятность, %
1,65	90,1
2,00	95,5
2,50	98,8
3,00	99,7

По исследуемым факторам оценивалось соответствие выборочных распределений нормальному. Полученные гистограммы распределений содержания железа показаны на рисунках 1 и 2.

Проверка распределений  $\text{SiO}_{2g}$ ,  $\text{MgO}_g$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{CaO}$  показала соответствие распределений нормальному закону. Распределения остальных показателей можно отнести к нормальному закону с меньшим уровнем достоверности. Отклонения от закона нормального распределения могут быть вызваны несколькими причинами.

Было выдвинуто предположение о том, что весь исследуемый период состоял из отдельных периодов с существенными различиями в средних значениях и стандартных отклонениях показателя из-за нестабильных поставок. При этом распределение будет отличаться от нормального тем сильнее, чем больше различия в средних и меньше в стандартных отклонениях показателя в отдельные периоды.

Таблица 2

Статистические характеристики основных химических компонентов шихты и агломерата за весь период

Показатель		Характеристики			
		среднее	minimum	maximum	станд. откл.
шихта*	$\text{Fe}_g$	61,43	54,30	66,10	1,85
	$\text{SiO}_{2g}$	5,75	1,50	9,20	1,25
	$\text{CaO}_g$	2,86	0,85	7,70	1,34
	$\text{MgO}_g$	2,18	0,28	5,98	0,78
	$\text{B}_{2g}$	0,54	0,13	3,80	0,36
агломерат	$\text{Fe}$	55,50	46,40	62,18	2,38
	$\text{SiO}_2$	7,13	2,67	42,30	2,52
	$\text{CaO}$	12,00	5,15	24,75	3,03
	$\text{MgO}$	3,10	1,16	8,60	1,98
	$\text{B}_2$	2,11	0,75	4,54	0,64

\*Индекс g у показателя указывает на значение в аглошихте, при отсутствии индекса показатель относится к агломерату;  $\text{B}_2$  — основность  $\text{CaO/SiO}_2$ .

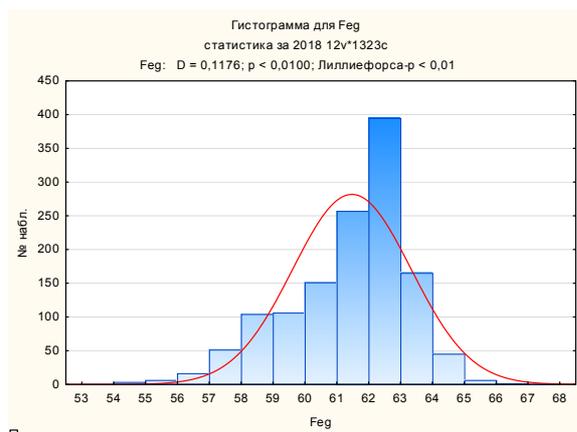


Рисунок 1 — Гистограмма распределения  $Fe_g$  в агломерационной шихте

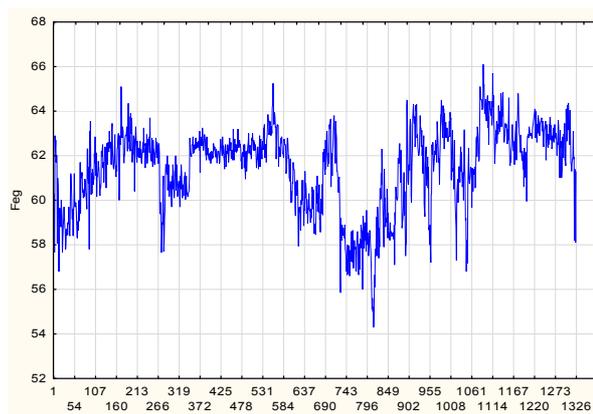


Рисунок 3 — Изменения содержания Fe в шихте, % (по оси абсцисс «Номера проб»)

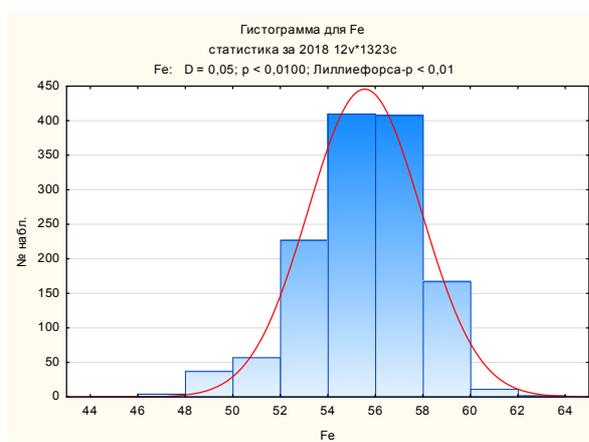


Рисунок 2 — Гистограмма распределения Fe в агломерате

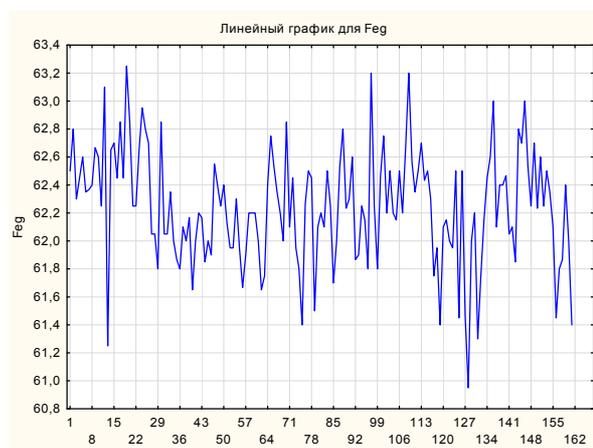


Рисунок 4 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 360–520)

Для проверки этого предположения был построен график последовательного изменения содержания Fe в шихте в течение всего периода (рис. 3).

Анализируя данные, представленные на рисунке 3, можно выделить периоды с разными по величине колебаниями Fe в шихте:

- с достаточно малыми колебаниями — период наблюдений 360–520, всего 161 наблюдение (рис. 4);

- со средними колебаниями — период наблюдений 1–213, всего 213 наблюдений (рис. 5);

- с существенно большими колебаниями — период наблюдений 820–1061, всего 235 наблюдений (рис. 6).

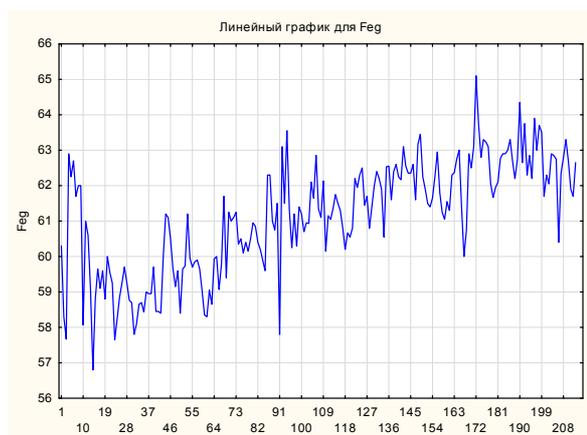


Рисунок 5 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 1–213)

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

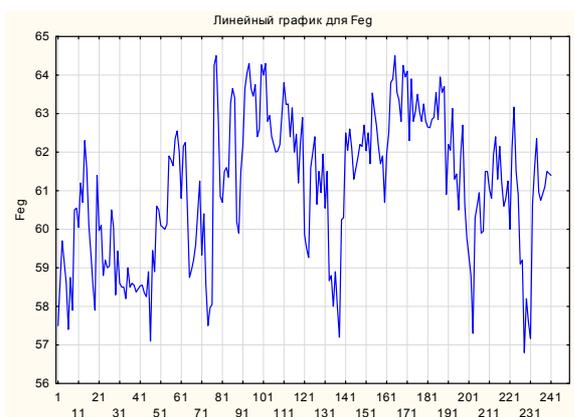


Рисунок 6 — Изменения содержания Fe в шихте (наблюдения 820–1061)

Статистические характеристики показателей за эти периоды представлены в таблице 3.

В настоящее время техническими условиями и стандартами рекомендуются пределы колебаний качества агломерационной руды или шихты по содержанию железа  $\pm 0,5\%$ , основности агломерата  $\pm 0,05$ , содержания железа в агломерате  $\pm 0,3\%$ .

Анализ колебаний содержания железа в шихте показал, что наименьший интервал колебаний (1-й период), в который попадает 95 % проб, составляет  $0,41\% \cdot 2 = \pm 0,82\%$ . Для содержания железа в агломерате такой интервал (также соответствует 1-му периоду) составляет  $1,09\% \cdot 2 = \pm 2,18\%$ .

В 1-м периоде по основности  $B_2$  агломерата был достигнут наименьший интервал колебаний  $0,31\% \cdot 2 = \pm 0,62\%$ .

В остальные периоды интервалы колебаний были существенно (в несколько раз) выше.

Связь между колебаниями компонентов шихты и агломерата можно установить, используя статистические методы. Для оценки тесноты линейной связи между переменными обычно используются значения коэффициента корреляции. По данным за весь период были рассчитаны парные коэффициенты корреляции основных показателей химического состава агломерационной шихты и агломерата (табл. 4).

Таблица 3

Статистические характеристики показателей по периодам

Показатель	Период	Наблюдений	Среднее значение	Стандартное отклонение
Fe <sub>g</sub>	1	161	62,24	0,41
	2	213	61,12	1,59
	3	235	61,12	1,88
SiO <sub>2g</sub>	1	157	6,78	0,49
	2	213	6,00	1,64
	3	235	5,48	1,35
CaO <sub>g</sub>	1	161	1,40	0,23
	2	213	2,44	0,79
	3	235	3,92	1,35
MgO <sub>g</sub>	1	161	1,77	0,41
	2	103	2,08	0,49
	3	146	2,34	1,13
B <sub>2g</sub>	1	161	0,21	0,04
	2	213	0,42	0,12
	3	235	0,84	0,58
Fe	1	161	55,95	1,09
	2	213	56,27	1,86
	3	241	54,63	2,35
SiO <sub>2</sub>	1	161	6,64	0,42
	2	212	10,86	3,71
	3	241	5,89	1,02

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

Продолжение таблицы 3

Показатель	Период	Наблюдений	Среднее значение	Стандартное отклонение
CaO	1	161	11,35	1,44
	2	213	10,27	2,19
	3	241	13,38	3,02
MgO	1	161	1,79	0,28
	2	213	6,92	1,07
	3	241	2,21	0,69
B <sub>2</sub>	1	161	1,73	0,31
	2	213	1,96	0,51
	3	241	2,39	0,81
FeO	1	161	10,39	1,69
	2	213	1,48	0,16
	3	241	10,17	1,65

Таблица 4

Парные коэффициенты корреляции основных показателей химического состава агломерационной шихты и агломерата (жирным выделены значимые коэффициенты)

Показатели химического состава аглошихты, %	Показатели химического состава агломерата, %					
	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	B <sub>2</sub>	FeO
Fe <sub>g</sub>	<b>0,58</b>	0,16	<b>-0,53</b>	-0,07	<b>-0,41</b>	-0,02
SiO <sub>2g</sub>	-0,16	-0,13	0,15	<b>-0,49</b>	<b>-0,46</b>	0,40
CaO <sub>g</sub>	<b>-0,42</b>	-0,34	<b>0,43</b>	-0,03	<b>0,41</b>	0,16
MgO <sub>g</sub>	<b>-0,57</b>	-0,05	<b>0,51</b>	0,33	<b>0,67</b>	-0,22
B <sub>2g</sub>	-0,27	-0,30	0,29	0,11	<b>0,53</b>	0,04

Связь между содержанием железа в шихте и агломерате оценивается значимым коэффициентом  $R=0,58$ . Это позволяет утверждать, что уменьшение колебаний железа в шихте привело бы к уменьшению колебаний железа в агломерате. Использование для этих целей CaO<sub>g</sub> и MgO<sub>g</sub> менее эффективно из-за их меньших количеств в шихте.

Колебания основности агломерата связаны с колебаниями всех компонентов шихты, а с содержанием MgO<sub>g</sub> в наибольшей степени.

Полученные результаты позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Содержание железа в шихте в исследованном периоде изменялось от 54,3 % до 66,1 %. Закон распределения показателя

отличался от нормального. Возможным объяснением является наличие отдельных периодов с существенными различиями в средних значениях.

2. Основность агломерата изменялась от 0,75 до 4,54 ед. Закон распределения показателя близок к нормальному. Колебания основности агломерата связаны с колебаниями всех компонентов шихты, а с содержанием MgO<sub>g</sub> в наибольшей степени.

3. Колебания агломерата по основности и содержанию железа существенно превышают рекомендуемые.

4. Колебания агломерата по основности и содержанию железа могут быть уменьшены при уменьшении колебаний в составе шихты железа и оксида магния, что улучшит качество агломерата.

**Список источников**

1. Пузанов В. П., Кобелев В. А. Введение в технологию металлургического структурообразования. Екатеринбург : УрОРАН, 2005. 501 с.

2. Кармазин В. И. Обогащение руд черных металлов : учебник для вузов. М. : Недра, 1982. 216 с.
3. Шумилов К. А., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. Автоматизированные системы управления подготовкой металлургического сырья и доменным переделом. М. : Металлургия, 1979. 184 с.
4. Волков Ю. П. Технолог-доменщик. М. : Металлургия, 1986. 263 с.
5. Товаровский И. Г. Доменная плавка. 2-е изд. Днепропетровск : Пороги, 2009. 768 с.

© Должиков В. В., Федотов О. В., Скубыря Н. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,  
вед. инженером технического отдела управления ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 17.06.2024.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Должиков Валерий Васильевич**, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Федотов Олег Витальевич**, старший преподаватель каф. металлургических технологий  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия,  
e-mail: fovit2012@yandex.ru

**Скубыря Никита Андреевич**, магистрант каф. металлургических технологий  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия

**Dolzhiikov V. V., \*Fedotov O. V., Skuburya N. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk,  
Lugansk People's Republic, Russia, \*e-mail: fovit2012@yandex.ru)

### INVESTIGATING FLUCTUATIONS IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF SINTERING MIXTURE AND SINTER

*Statistical analyses of studying the results of smelter's sintering plant operation have been carried out to determine the magnitude of fluctuations in the chemical composition of sintering mixture and sinter. Significant deviations from the recommended values of fluctuation intervals were found in iron content and sinter basicity. It is shown that the observed fluctuations in the sinter chemical composition can be reduced by decreasing the fluctuations of iron content in mixture.*

**Key words:** iron ore sintering, sinter, sintering mixture, quality of sinter, fluctuations of chemical composition in the sintering mixture, fluctuations in the sinter chemical composition.

### References

1. Puzanov V. P., Kobelev V. A. Introduction to metallurgical structure formation technology [Vvedenie v tekhnologiyu metallurgicheskogo strukturoobrazovaniya]. Ekaterinburg : UrDRAS, 2005. 501 p. (rus)
2. Karmazin V. I. Enrichment of ferrous metal ores: textbook [Obogashchenie rud chernykh metallov : uchebnyk dlya vuzov]. M. : Nedra, 1982. 216 p. (rus)
3. Shumilov K. A., Shparber L. Ya., Gusarov A. K. Automated control systems for preparation of metallurgical raw materials and blast furnace processing [Avtomatizirovannye sistemy upravleniya podgotovkoj metallurgicheskogo syr'ya i domennym peredelom]. M. : Metalurgija, 1979. 184 p. (rus)
4. Volkov Yu. P. Technologist-blast-furnace man [Tekhnolog-domenshchik]. M. : Metalurgija, 1986. 263 p. (rus)
5. Tovarovskij I. G. Domain melting. 2nd ed. [Domennaya plavka. 2-e izdanie]. Dnepropetrovsk : Porogi, 2009. 768 p. (rus)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

***Dolzhikov Valery Vasilyevich***, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia

***Fedotov Oleg Vitalyevich***, Senior Lecturer of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia,  
e-mail: fovit2012@yandex.ru

***Skuburya Nikita Andreevich***, Candidate for a Master's Degree of the Department of Metallurgical Technologies  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Lugansk People's Republic, Russia