МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.162.262 EDN: SDEQUJ

Должиков В. В., *Лебедев В. А., Баринова Ю. Ю.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: lebedev_6082@mail.ru*

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА КОКСА НА СОДЕРЖАНИЕ СЕРЫ В ЧУГУНЕ

Приведен статистический анализ изменения содержания серы в чугуне в зависимости от основных показателей качества доменного кокса за определенный технологический период. В результате проведенных исследований не выявлено существенного влияния качества кокса (прочность, истираемость, содержание серы) на содержание серы в чугуне, выпускаемом из доменной печи, что может быть связано с высокой инерционностью работы агрегата и его способностью к сглаживанию колебаний состава шихты и чугуна на определенном временном промежутке.

Ключевые слова: *чугун, качество кокса, содержание серы в чугуне.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Кокс является основным видом топлива и восстановителем железа в технологии выплавки чугуна в доменной печи [1, 2]. От уровня его качества во многом зависят как особенности протекания доменной плавки, так и характеристики получаемого чугуна. Одним из наиболее значимых показателей качества чугуна считается содержание серы, относящейся к числу вредных примесей и поступающей в чугун из кокса [1, 3].

Достижение высоких технико-экономических показателей работы доменной печи, включая производительность агрегата, снижение расхода кокса и других восстановителей, а также увеличение продолжительности кампании, в значительной мере определяется качеством используемого кокса [1, 4]. Особую роль при этом играют его физические и химические свойства. Требования к данным характеристикам обусловлены функциями, выполняемыми коксом в ходе доменного процесса.

Постановка задачи. Для эффективного управления технологическим процессом производства чугуна в доменных печах необходимо знать, как влияют качественные характеристики кокса на химический состав выплавляемого чугуна и в первую очередь на содержание серы в нем, являющейся основной вредной примесью.

Также необходимо учитывать, что современная технология выплавки чугуна всегда предусматривает корректировку технологического процесса в т. ч. для его десульфурации путем обеспечения требуемой основности шлака при изменении качества используемой шихты.

Объект исследования — технологический процесс производства чугуна в доменных печах.

Предмет исследования — механизм влияния характеристик качества кокса на содержание серы в чугуне.

Цель исследования: оценка связи между содержанием серы в чугуне и ключевыми показателями качества кокса в реальном технологическом процессе.

Задачи исследования:

– выявление статистически значимых связей между содержанием серы в чугуне и ключевыми показателями качества кокса;

– интерпретация полученных результатов и обоснование их причин с точки зрения технологии производственного процесса.

Методика исследования. Статистические расчеты взаимосвязей между характеристиками качества доменного кокса и выплавляемого чугуна с использованием производственных данных за конкретный календарный период.

Изложение материала. Оценка качества кокса осуществляется по комплексу

показателей, имеющих большое значение для доменного производства. К основным химическим характеристикам относятся содержание серы, а также зольность кокса, величина которой обратно связана с содержанием углерода.

В качестве механических характеристик рассматриваются показатель истираемости M10, а также показатели прочности M25 и M40, отражающие способность коксовых кусков сохранять целостность структуры под воздействием внешних нагрузок [1, 3].

Помимо перечисленных параметров, для характеристики качества кокса используют показатели реакционной способности (CRI) и прочности кокса после реакции (CSR), определяемые различными методами [5, 6]. Вместе с тем существующие способы оценки требуют дополнительного анализа с точки зрения их точности и достоверности. Основным недостатком большинства методик является невозможность одновременного моделирования воздействия высоких температур, окислительной атмосферы и механических нагрузок, характерных для реальных условий доменной плавки [3, 5].

Для выполнения статистического анализа был выбран период в 18 суток. Информация о содержании серы в чугуне и характеристиках кокса была получена на основании данных плавильных журналов доменной печи полезным объемом 1719 м^3.

Временные ряды изменения содержания серы в чугуне и отдельных характеристик кокса представлены на рисунках 1 и 2. Значения содержания серы в чугуне приведены с временным сдвигом относительно показателей кокса, что учитывает транспортное запаздывание процесса [4, 7, 8]. Величина транспортного запаздывания принималась равной 7 часам.

Временной ряд содержания серы в коксе (рис. 1) характеризуется нестационарностью. Во второй половине анализируемого периода (после 150–170 наблюдений) отмечается увеличение содержания серы с последующим снижением к завершению наблюдений. Среднее значение показателя возросло с 0,94 до 1,03 %, тогда как среднеквадратичное отклонение практически не изменилось и составило $s = 0{,}034$ %. Проверка по t-критерию показала статистическую значимость различий средних значений с вероятностью 99,75 % [7].

Одновременно временной ряд содержания серы в чугуне оставался практически неизменным. Средние значения показателя для соответствующих интервалов составили 0,021 и 0,024 % при сохранении среднеквадратичного отклонения на уровне $s = 0{,}008$ %.

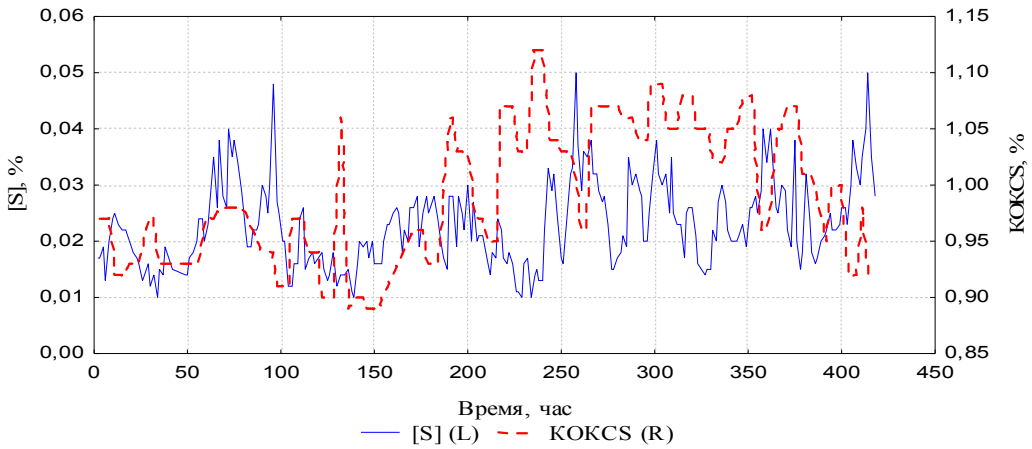


Рисунок 1 — Изменение содержания серы в чугуне [S] и коксе KOKCS во времени

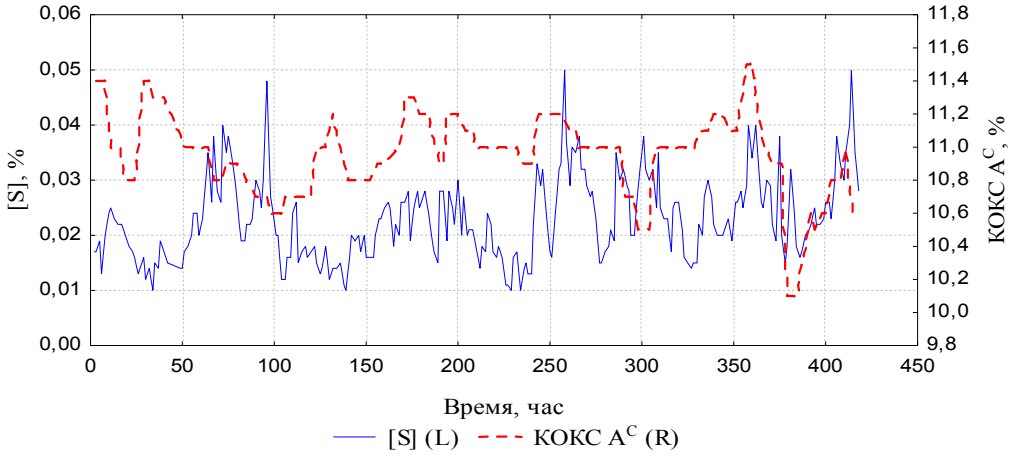


Рисунок 2 — Изменение содержания серы в чугуне [S] и золы в коксе КОКС A^C во времени

Из рисунка 2 следует, что временные ряды содержания серы в чугуне [S] и зольности кокса обладают свойством стационарности, что подтверждено результатами статистической проверки по методикам, приведенным в работах [7, 8].

Для оценки стационарности временного ряда содержания серы в чугуне [S] была построена автокорреляционная функция (рис. 3). Быстрое уменьшение ее со временем — признак стационарности ряда.

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии статистически значимой зависимости между содержанием серы в коксе и содержанием серы в чугуне по данной выборке.

Для объяснения данного факта могут быть предложены две версии:

– колебания содержания серы в коксе нивелируются значительной аккумулирующей способностью шлака в печи;

– прогнозируемые отклонения компенсируются соответствующими технологическими приемами, в частности повышением основности шлака [2, 4]. В исследуемом периоде кокс поступал в доменную печь из двух коксовых цехов, несколько отличающихся технологией.

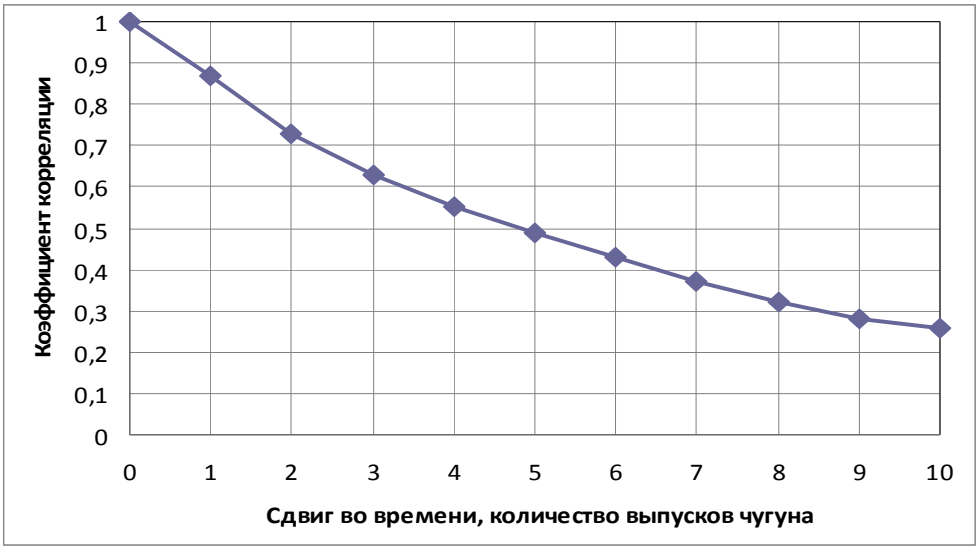


Рисунок 3 — Автокорреляционная функция изменения содержания серы в чугуне [S]

Проведенные статистические исследования позволили установить, что, из всех анализируемых показателей только показатель М10 является статистически чувствительным к используемым технологическим процессам.

С целью выявления статистических взаимосвязей между рассматриваемыми характеристиками качества кокса, а также содержания серы в чугуне рассчитаны парные коэффициенты корреляции по данным анализируемого периода. Результаты расчетов приведены в таблице.

Следует обратить внимание на статистически значимую связь показателя М10 с содержанием серы и золы в коксе. Это еще раз подтверждает сделанный выше вывод о представительности показателя М10 как характеристики качества кокса.

Таблица

Коэффициенты парной корреляции исследуемых характеристик (курсивом выделены значимые)

Переменные	Кокс М10	Кокс W	Кокс S	[S]	Кокс A^C
Кокс М10	1,00	–0,13	***0,24***	0,16	***0,34***
Кокс W	–0,13	1,00	–0,15	–0,02	***–0,20***
Кокс S	***0,24***	–0,15	1,00	0,10	0,06
[S]	0,16	–0,02	0,10	1,00	0,02
Кокс A^C	***0,34***	***–0,20***	0,06	0,02	1,00

Из данных таблицы следует, что ни одна из рассмотренных характеристик кокса не имеет статистически значимой связи с содержанием серы в чугуне.

В исследуемом периоде основность шлака была достаточно высокой (на уровне 1,20). Это определяет его высокую аккумулирующую способность по сере.

При анализе временных рядов изменения содержания серы в коксе и изменения основности шлака статистически значимой связи не было обнаружено. При средней основности шлака 1,21 в первом периоде (сера в коксе 0,94 %) повышение основности до 1,22 во втором периоде (сера в коксе 1,03 %) оказалось статистически незначимым. Следует отметить, что «… для выплавки одного и того же сорта чугуна, но в разных печах одного цеха, неизбежно требуются различные шлаковые режимы, что объясняется особенностями их дутьевого режима, объема, профиля, настылей, разгара кладки, состояния засыпного аппарата и т. д.» [1].

Выводы и направление дальнейших исследований. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный статистический анализ, в рамках исследуемого интервала изменений качественных показателей доменного кокса, не выявил корреляции между уровнем серы в коксе и ее концентрацией в чугуне. Даже при возрастании содержания серы в коксе во второй половине анализируемого периода существенных изменений уровня серы в чугуне зафиксировано не было.

2. Не удалось установить статистически значимых связей между содержанием серы в чугуне и ключевыми показателями качества кокса, включая его сернистость, зольность, влажность, а также показателем истираемости М10.

3. Для показателя истираемости кокса М10 была обнаружена статистически значимая взаимосвязь с содержанием серы и золы в коксе.

4. Анализ временных рядов продемонстрировал, что динамика содержания серы в коксе носит нестационарный характер. В то же время ряд значений содержания серы в чугуне остается практически неизменным, демонстрируя стационарность.

5. Наиболее вероятным объяснением отсутствия выраженного влияния вариаций в качестве кокса на содержание серы в чугуне является относительно высокая основность шлака и инерционность показателей работы доменной печи при устойчивом технологическом режиме, что проявляется в способности к сглаживанию колебаний.

6. Результаты проведенного исследования указывают на необходимость учета совокупности технологических факторов

доменной плавки при оценке влияния качества кокса на химический состав чугуна. К таким факторам относятся основность шлака, температурный режим, расход восстановителей и газодинамические особенности процесса.

7. Практическая ценность данной работы заключается в подтверждении устойчивости доменного процесса к умеренным колебаниям показателей качества кокса. Сделанные выводы могут быть применены при анализе существующих технологических режимов и их последующей оптимизации.

В дальнейшем планируются аналогичные исследования параметров работы доменных печей различного объема.

Список источников

1. Металлургия чугуна : учебник для вузов / Е. Ф. Вегман и [др.] ; под ред. Ю. С. Юсфина. М. : Академкнига, 2004. 774 с. URL: https://djvu.online/file/LEzlVxZ2ioOiY.

2. Гилева Л. Ю., Каплун Л. И., Загайнов С. А. Металлургия чугуна : учебное пособие / под ред. С. А. Загайнова. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2021. 128 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/books/161235/details.

3. Теплотехника доменного процесса / под общ. ред. Б. И. Китаева и Ю. Г. Ярошенко. М. : Металлургия, 1978. 248 с.

4. Доменное производство : справочник : в 2 т. / под ред. д-ра техн. наук, проф. Е. Ф. Вегмана. М. : Металлургия, 1989. Т. 1 : Подготовка руд и доменный процесс. 494 с.

5. ГОСТ Р 54250-2010 (ИСО 18894:2006). Кокс. Определение реакционной способности кокса (CRI) и прочности кокса после реакции (CSR). М. : Стандартинформ, 2011. 16 с.

6. ISO 18894:2018. Coke — Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR). Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/72266.html.

7. Сеньченков В. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных. СПб. : ГУАП, 2006. 243 с.

8. Максимова О. В. Математическая статистика и анализ данных : учебное пособие. М. : Издательский Дом МИСиС, 2023. 172 с. URL: https://www.iprbookshop.ru/books/137534/details.

© Должиков В. В., Лебедев В. А., Баринова Ю. Ю., 2026

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В., нач. патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.

Статья поступила в редакцию 01.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Лебедев Владимир Александрович, *канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: lebedev_6082@mail.ru

Баринова Юлия Юрьевна, *студент каф. металлургических технологий*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Dolzhikov V. V., *Lebedev V. A., Barinova Yu. Yu. *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: lebedev_6082@mail.ru)*

STATISTICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF COKE QUALITY ON SULFUR CONTENT IN PIG IRON

A statistical analysis of the variation of sulfur content in pig iron depending on the main quality indicators of blast furnace coke over a certain process period is presented. The studies found no significant effect of coke quality (strength, abrasion resistance, sulfur content) on the sulfur content in pig iron tapped from the blast furnace, which may be attributed to the high inertia of the unit's operation and its ability to smooth out fluctuations in burden and pig iron composition over a given period of time.

Key words: *pig iron, coke quality, sulfur content in pig iron.*

References

1. Vegman E. F. [et al.]. Pig iron metallurgy: a textbook for universities [Metallurgiya chuguna : uchebnik dlya vuzov]. Eds. Yusfina Yu. S. M. : Akademkniga. 2004. 774 p. URL: https://djvu.online/file/LEzlVxZ2ioOiY.

2. Gileva L. Yu., Kaplun L. I., Zagajnov S. A. Pig iron metallurgy: a study guide [Metallurgiya chuguna : uchebnoe posobie]. Eds. Zagajnov S. A. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta. 2021. 128 p. URL: https://www.iprbookshop.ru/books/161235/details.

3. Heat engineering of the blast furnace process [Teplotekhnika domennogo processa]. Endorsed by Kitaeva B. I. and Yaroshenko Yu. G. M. : Metallurgiya. 1978. 248 p.

4. Blast furnace production: handboo k: in 2 vol. [Domennoe proizvodstvo : spravochnik : v 2 t.]. Eds. Doctor in Engineering, Professor Vegman E. F. M. : Metallurgiya. 1989. Vol. 1 : Podgotovka rud i domennyj process. 494 p.

5. GOST R 54250-2010 (ISO 18894:2006). Coke. Determination of coke reactivity (CRI) and coke strength after reaction (CSR). [GOST R 54250-2010 (ISO 18894:2006). Koks. Opredelenie reakcionnoj sposobnosti koksa (CRI) i prochnosti koksa posle reakcii (CSR)]. M. : Standartinform. 2011. 16 p.

6. ISO 18894:2018. Coke — Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR). Geneva : International Organization for Standardization. 2018. URL: https://www.iso.org/standard/72266.html.

7. Sen'chenkov V. I. Statistical methods for processing experimental data [Statisticheskie metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh]. SPb. : SUAI. 2006. 243 p.

8. Maksimova O. V. Mathematical statistics and data analysis: a study guide [Matematicheskaya statistika i analiz dannyh : uchebnoe posobie]. M. : Izdatel'skij Dom MISiS. 2023. 172 p. URL: https://www.iprbookshop.ru/books/137534/details.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dolzhikov Valeriy Vasilyevich, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Lebedev Vladimir Aleksandrovich, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: lebedev_6082@mail.ru

Barinova Yulia Yurievna, *Student of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia