

Исследование физико-химических процессов LD-конвертирования с применением статистического метода

Представлены результаты исследований физико-химических процессов производства стали в двух параллельно работающих LD-конвертерах. На основе данных о химическом составе и температуре металлического расплава, полученных в условиях кислородного конвертирования, с использованием пакета прикладных программ StatSoft Statistica 8.0 выполнен анализ значимости различия средних значений для конвертеров с верхней продувкой.

Ключевые слова: LD-конвертер, технологические параметры, химический состав, температура, статистическая значимость, нормальность распределения, статистика, дисперсия.

Постановка задачи. При производстве стали в параллельно работающих LD-конвертерах наблюдаются различия термодинамических и кинетических условий процесса окислительного рафинирования металлической ванны. По этой причине появляются и различия в значениях характеристик металлического расплава, например температуры расплава и его химического состава. Это приводит к отличающимся друг от друга условиям протекания процессов окисления примесей и, как следствие, к дополнительным потерям ферросплавов и лигатур в дальнейшем. Поэтому появляется необходимость выбора соответствующего агрегата и технологии конвертирования с учетом планируемого сортамента. При исследовании процессов окислительного рафинирования в большегрузных конвертерах возникает необходимость оценки различия средних значений металлического расплава. Вместе с тем, для случая реальных физико-химических процессов в двух одновременно работающих большегрузных конвертерах важна достоверность оценок при их сравнении. Последние существенно зависят от погрешности определения значений переменных. Поэтому для выявления значимости различия средних значений характеристик металлического расплава, производимого в двух параллельно работающих большегрузных конвертерах, использованы методы стохастического (статистического) анализа.

Анализ последних исследований и публикаций. Современные научные исследования и производственная практика потребовали широкого применения математической статистики для анализа закономерностей массовых явлений во всех отраслях промышленности [1, 2]. Metallургическая промышленность, на наш взгляд, несколько запоздала с внедрением методов математической статистики; в основном их стали применять в последние десятилетия. Впервые эти методы использовали для анализа производственного процесса. Задача применения методов математической статистики обосновывается еще и тем, что современное развитие металлургии достигло такой стадии, при которой невозможно ограничиться только качественным анализом. Последний необходимо дополнить количественным описанием

процесса, что позволит в совершенстве изучить его, а следовательно, и надежно управлять им. Эти обстоятельства являются одной из основных предпосылок для автоматизации металлургического производства. Особого внимания в этой области заслуживают работы В. И. Кошелева, В. Н. Корнфельда, А. О. Войтова, Л. С. Штейнберга, В. С. Богушевского, в которых проведен анализ зависимостей между регулируемыми и регулируемыми факторами в различные периоды плавки в металлургических агрегатах [3, 4]. В настоящее время большое внимание уделяют анализу распределения случайных переменных, статистическим оценкам и проверкам гипотез, корреляционному и регрессионному методам анализа, а также некоторым другим методам статистической индукции [5, 6, 7].

Изложение основного материала. Создание детерминированной модели кислородно-конвертерной плавки затруднено из-за термодинамической неустойчивости системы. Вследствие этого, судьбу системы могут решать даже очень малые возмущения, часто выходящие за рамки экспериментального контроля [8]. Для систем далеких от равновесия, в частности системы «кислородно-конвертерный передел», общие экстремальные принципы равновесной термодинамики не выполняются. В этом случае достаточно эффективным способом исследования неравновесных систем является стохастический (статистический) метод. Несмотря на его недостатки, он представляется весьма эффективным при анализе физико-химических процессов в отдельно взятом агрегате, например в кислородном конвертере, и имеет широкие возможности.

Целью данной работы является исследование значимости различия средних значений химического состава и температуры металлического расплава, произведенного раздельно в двух 370-тонных конвертерах, работающих в режиме кислородного конвертирования с верхним дутьем.

В качестве метода проверки статистической гипотезы о равенстве средних двух выборок, использовались критерии параметрической и непараметрической статистики. Как известно, статистической гипотезой называется любое предположение о виде или

параметрах некоторого закона распределения. Проверяемую гипотезу обычно называют нулевой и обозначают H_0 . Наряду с нулевой гипотезой рассматривают альтернативную гипотезу H_1 , являющуюся логическим отрицанием H_0 . Вероятность α совершить ошибку первого рода, то есть отвергнуть гипотезу H_0 , когда она верна, называется уровнем значимости критерия. Уровень значимости p – это максимально приемлемая для исследователя вероятность отклонить нулевую гипотезу, когда на самом деле она верна. Величина уровня значимости обычно выбирается равной 0,05. Если p меньше, либо равно 0,05, то результат статистически значим; если p меньше или равен 0,01, то результат считают статистически высоко значимым. Для проведения статистического анализа использовали программный пакет STATISTICA 8. Массивы данных, которые анализировали, были представлены 88-ю плавками на первом конвертере (Конв_1) и 93-я плавками, полученными на втором конвертере (Конв_2). Массивы переменных формировали с учетом того, что содержание углерода в углеродистом полупродукте на повалке не превышало 0,07 %мас., так как плавки с большим содержанием углерода подвергаются додувке. В качестве независимых переменных – предикторов, выбирали следующие: содержание углерода [C], марганца [Mn], фосфора [P], серы [S], активность кислорода $a_{[O]}$ и температура расплава T , °C. Вводили также группирующую переменную, с помощью которой кодировали два состояния системы – Конв_1 и Конв_2 соответственно. На первом этапе анализа реализована проверка соответствия распределения случайных величин массивов закону нормального распределения. Нормальность распределения переменной – это слишком жесткое требование, поэтому в работе ограничились построением диаграмм размаха (рис. 1-6). Диаграммы размаха позволяют визуально судить о наличии или отсутствии симметричности в распределении каждой из переменной относительно ее медианы. Если симметричность распределения значений переменной относительно медианы подтверждается, то считается, что переменная распределена в соответствии с нормальным законом распределения.

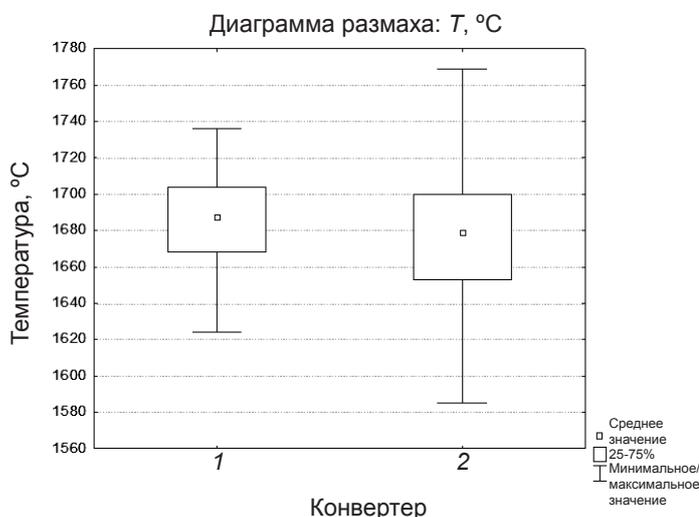


Рис. 1. Диаграмма размаха для переменной (T , °C) Конв_1 и Конв_2, (%мас.)

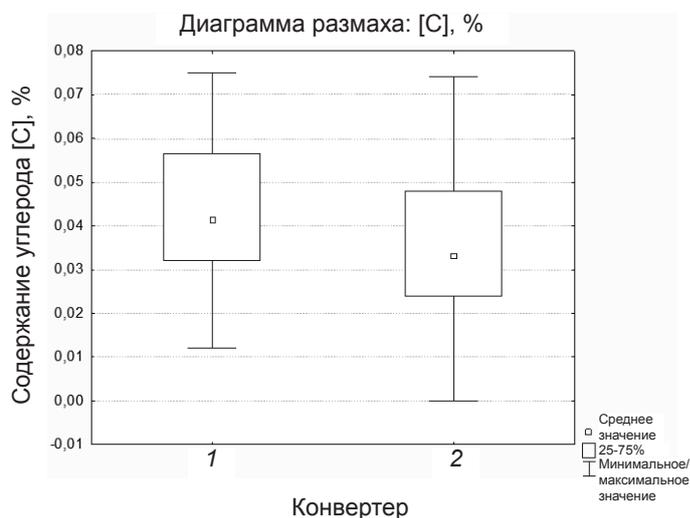


Рис. 2. Диаграмма размаха для переменной [C] Конв_1 и Конв_2 (%мас.)

Относительно переменных T , [C], [S] и [P] можно утверждать, что для значений группирующей переменной 1 и 2, распределение их случайных значений может быть признанным соответствующим нормальному.

Диаграммы размаха переменных [Mn] и $a_{[O]}$ существенно отклоняются от нормального распределения: как для значения группирующей переменной 1, так и для значения 2, «хвосты» распределения значений этих переменных несимметричны относительно их медиан. В этой связи для дальнейшего анализа использование параметрических критериев для оценки значимости различия средних значений не представляется возможным.

Для случая соответствия распределения переменных нормальному распределению – это касается переменных T , [C], [S] и [P] вначале следует установить значимо или незначимо отличаются дисперсии каждой из переменных для значений 1 и 2 группирующей переменной. С этой целью использовали статистику Левена. И если устанавливается, что дисперсии переменных значимо не отличаются, делается вывод о различии средних значений переменной по величине уровня значимости p . Статистика Левена

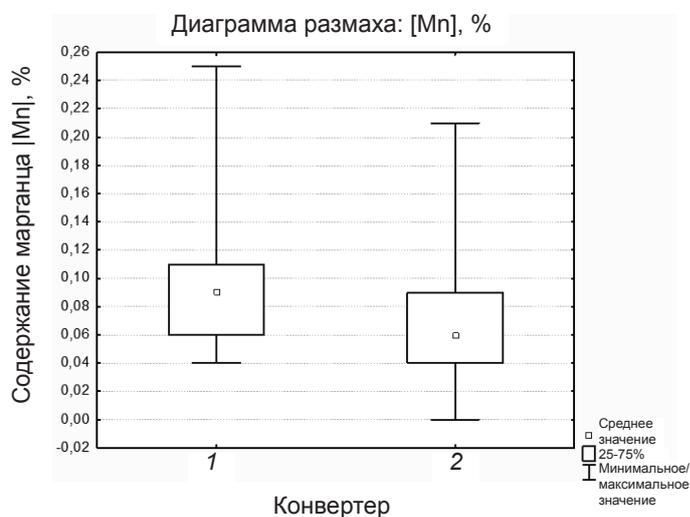


Рис. 3. Диаграмма размаха для переменной [Mn] Конв_1 и Конв_2, (%мас.)

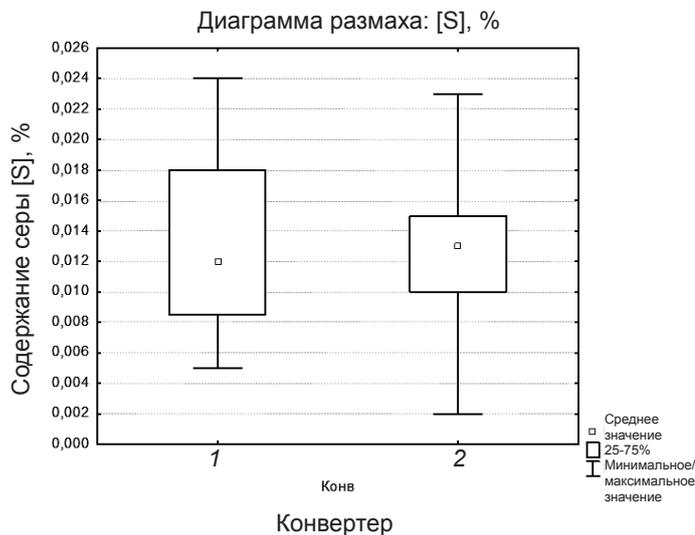


Рис. 4. Диаграмма размаха для переменной [S] Конв_1 и Конв_2.

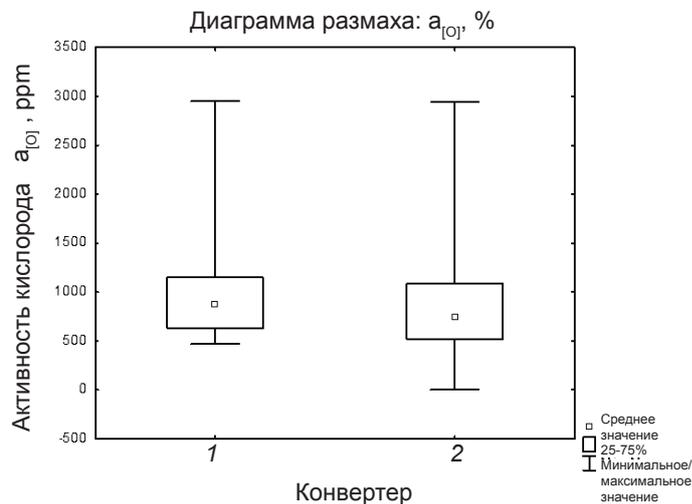


Рис. 6. Диаграмма размаха для переменной $a_{[O]}$ Конв_1 и Конв_2

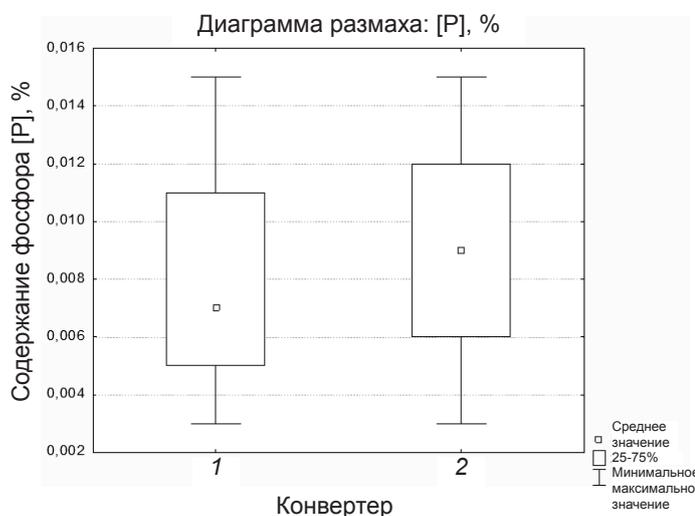


Рис. 5. Диаграмма размаха для переменной [P] Конв_1 и Конв_2

для переменной T дает значение p -уровня, равное 0,0046, что менее 0,05. Поэтому можно утверждать, что дисперсии выборок в состоянии 1 и 2 существенно отличаются друг от друга. Это подтверждается и сравнением величин стандартного отклонения переменной T : для состояния группирующей переменной 1 оно равно 25,42, а для состояния 2 – 35,65.

Диаграмма размаха переменной T – дополнительное тому подтверждение. Заслуга теста p – Левена в том, что отклонение дисперсий не является случайным (табл. 1). Статистика Левена для переменной [C] определяет, что дисперсии выборок для состояния 1 и 2 также значительно отличаются: значение p -уровня со-

ставляет 0,029, что менее 0,05.

Значение p -уровня статистики Левена для переменных [S] и [P] для состояния группирующей переменной 1 и 2 значимо не отличаются. Для переменной [S] расчетное значение p -уровня равно 0,153, что превышает 0,05. Для переменной [P] его значение равно 0,4202, что значительно превышает 0,05. В двух последних случаях можно делать вывод о значимости или незначимости различия средних. Значение p -уровня для средних значений переменной [S] составляет 0,4273, что больше, чем 0,05. Отсюда следует вывод о том, что средние значения обсуждаемой переменной значимо не отличаются: 0,0134 и 0,0128 % для состояний группирующей переменной 1 и 2 при величине стандартного отклонения 0,052 и 0,0050. Значение p -уровня для переменной [P] составило, как и в предыдущем случае, величину, превышающую 0,05, а для активности кислорода ($a_{[O]}$), ppm значение p -уровня равно 0,1837. В этой связи корректен вывод о незначимости различия средних переменной для состояния 1 и 2: 0,0078 и 0,0085 % при значениях дисперсий 0,0032 и 0,0034. Таким образом, медианы переменных [S] и [P] признаются значимо не различающимися. Для анализа значимости различий средних в случае существенного различия дисперсий – переменные T и [C], использовался прием оценки t -критерия с отдельными оценками дисперсий. Относительно переменной [C] расчетное значение p -уровня составило величину 0,0029, что менее 0,05 (табл. 2). Следовательно, средние значения переменной [C] значимо отличаются друг от друга: 0,0441 против 0,0366 % при значениях дисперсий 0,0144 и 0,0186.

Таблица 1

Значения критерия Левена

Переменная	Среднее арифметическое группы 1	Среднее арифметическое группы 2	p	Объем выборки группы 1	Объем выборки группы 2	Стандартное отклонение группы 1	Стандартное отклонение группы 2	p -Левена
(T , °C)	1684,3	1676,7	0,1061	88	93	25,41986	35,65004	0,00462
[C]	0,0441	0,0366	0,0029	88	93	0,01447	0,018586	0,02908
[S]	0,0134	0,0128	0,4273	88	93	0,005204	0,005018	0,15304
[P]	0,0078	0,0085	0,1837	88	93	0,003292	0,003377	0,42021

Значения t – критерия с отдельными оценками дисперсий

Переменная	Среднее арифметическое группы 1	Среднее арифметическое группы 2	p	Объем выборки группы 1	Объем выборки группы 2
$(T, ^\circ\text{C})$	1684,3	1676,8	0,1061	88	93
[C]	0,0441	0,036656	0,0029	88	93

Касательно переменной T , дисперсии которой для состояний 1 и 2 значительно отличаются друг от друга, расчетное значение p -уровня составило величину 0,1061 против 0,05. Следовательно, значение переменной T для состояний 1 и 2 значительно не отличаются друг от друга, то есть значимого различия в средних 1684,3 и 1676,8 $^\circ\text{C}$ не существует. Как уже упоминалось ранее, диаграммы размаха для переменных [Mn], и особенно для $a_{[\text{O}]}$, существенно отличаются несимметричностью относительного среднего значения. Иначе говоря, распределение переменных [Mn] и $a_{[\text{O}]}$ не может быть признанным соответствующим нормальному распределению как для значения 1, так и 2. Для анализа значимости различия переменных в подобных случаях, использовался аналог t -критерия, а именно непараметрический t -критерий – критерий Манна-Уитни (Mann-Whitney U-test). Для переменной $a_{[\text{O}]}$ уточненное расчетное значение p -уровня соответствует значению 0,082, что превышает 0,05 (табл. 3).

Таким образом, средние переменной $a_{[\text{O}]}$ для значений группирующих переменных 1 и 2 отличаются незначительно или значимое различие в значении переменной $a_{[\text{O}]}$ отсутствует. Значения средних составляет 920,48 и 842,74 ppm для значений группирующей переменной 1 и 2 соответственно. Расчетное значение p -уровня для критерия Mann-Whitney составляет 0,00098 для переменной [Mn], распределение которой не соответствует нормальному. Выполнение условия $0,00098 < 0,05$, указывает на значимость различий средних переменной [Mn]. Значения средних для переменной составляет величины 0,0891 и 0,0697 для значений группирующей переменной 1 и 2 соответственно. В заключение следует отметить, что оба конвертера по ряду характеристик металлического расплава – по-разному работающие агрегаты, независимо от среднестатистического состава шихтовых материалов, объема и чистоты кислорода, израсходованного на конвертирование и иные технологические характеристики плавки. Углерод и марганец – окисляющиеся примеси металлического расплава и в заключительной стадии кислородного конвертирования окисление углерода сопровожда-

ется, как известно, окислением марганца [9]. Эта тенденция сохраняется для двух конвертеров, но эффективность обезуглероживания металлического расплава и окисление марганца, в нем содержащегося, для второго конвертера выше, чем для первого. Можно предположить, что снабжение расплава кислородом лучше во втором конвертере, чем в первом. Последнее предположение требует дополнительных исследований.

Результаты исследования, изложенные выше, должны найти применение при выборе более выгодного в экономическом и технологическом плане варианта технологии выплавки стали и сталеплавильного агрегата в реальных условиях конкретного производства.

Выводы

Установлены существенные различия в физико-химических процессах производства стали в двух одинаковых агрегатах – большегрузных конвертерах, работающих параллельно в идентичных условиях. Для определения причин появления этих различий, в том числе в количественном выражении, необходимо проведение дополнительного анализа с привлечением методики и полученных данных, представленных в настоящей публикации.

Особенность рассмотренных процессов конвертирования заключается в том, что расчетным путем показано соответствие диаграмм размаха для переменных (T ($^\circ\text{C}$), [C], [S], [P]) распределению переменных закону нормального распределения. Вместе с тем, распределения переменных [Mn] и [C], оцененные тем же способом, закону нормального распределения не соответствуют.

Установлено, что для переменных T ($^\circ\text{C}$), и [C] гипотеза о равенстве дисперсий не может быть принята. Расчет сравнения средних значений проводился по методике значений t -критерия с отдельными оценками дисперсий. Результаты расчета показывают, что средние значения переменной [C] значительно отличаются для расплавов обоих конвертеров: 0,044 и

Таблица 3

Тест Манна-Уитни

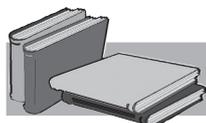
Переменная	Суммарный ранг группы 1	Суммарный ранг группы 2	U	Z	p -уровень	Z -уточненный	p -уровень	Объем выборки группы 1	Объем выборки группы 2
[Mn]	9167,50	7303,50	2932,5	3,2911	0,0010	3,3049	0,00095	88	93
$a_{[\text{O}]}$	8621,00	7850,00	3479,0	1,7399	0,0818	1,7400	0,0819	88	93

0,037 % соответственно. В то же время средние значения переменной T , (°C) значимо не отличаются.

Показано, что гипотеза равенства дисперсий для переменных [P] и [S] подтверждается – значения переменных принадлежат к одним и тем же генеральным совокупностям. Значения средних для этих переменных: 0,0079 и 0,0085 % для переменной [P], а для [S] – 0,0134 и 0,0128 % соответственно для

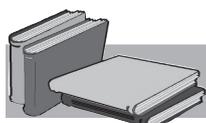
первого и второго конвертеров и значимо не различаются.

Критерий Манна-Уитни для случая использования метода непараметрической статистики указывает на отсутствие значимых различий в значениях средних для переменной $a_{[O]}$. Тем не менее, различия средних для переменной [Mn] оказались значимыми.



ЛИТЕРАТУРА

1. Кнотек М., Войта Р., Шефциц И. Анализ металлургических процессов методами математической статистики. – М.: Металлургия, 1968. – 212 с.
2. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
3. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента. – Киев – Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 120 с.
4. Богусhevский В. С., Литвинов Л. Ф., Рюмшин Н. А., Сорокин В. В. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой. – К.: НПК «Киевский институт автоматки», 1998. – 304 с.
5. Корнеева А. А., Корнет М. Е. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки. – Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 10. – С.24-28.
6. Халафян А. А. Электронный учебник по статистике: в 3-х т. [Электронный ресурс] – М.: Statsoft, 2007. – 2595 с. – Режим доступа: <http://www.Statsoft./home/textbook/default.htm>.
7. Халафян А. А. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
8. Боровиков В. А. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов, 2 – изд. – Питер, 2003. – 688 с.
9. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов: учебное пособие для вузов. – Киев – Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 280 с.



REFERENCES

1. Knotek M., Voita R., Shefits I. (1968). Analiz metallurgicheskikh processov metodami matematicheskoi statistiki. [Analysis of metallurgical processes using the techniques of mathematical statistics]. Moscow: Metallurgiiia. [in Russian].
2. Pustyl'nik E. I. (1968). Statisticheskie metody analiza i obrabotki nabludeni. [Statistical methods of the analysis and processing of observations]. Moscow: Nauka. [in Russian].
3. Kovshov V. N. (1982). Postanovka inzhenerenogo eksperimenta. [Staging of engineering experiment]. Donetsk: Vishcha shkola. Golovnoe izd-vo. [in Russian].
4. Bogushevskii V. S., Litvinov L. Ph., Rumshin N. A., Sorokin L. V. (1998). Matematicheskie modeli i sistemy upravleniia konvertvernoi plavkoi. [Mathematical models and control systems by converter melting]. Kiev: NPK Kievskii istitut avtomatiki. [in Russian].
5. Korneeva A. A., Kornet M. E. (2013). Neparametricheskoe modelirovanie konvertvernoi plavki. [Non-parametric design of the converter melting]. Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia, pp. 24-28. [in Russian].
6. Khalafian A. A. (2007). Elektronnyi uchebnik po statistike: v 3-h t. [Electronic textbook on statistics: in 3-d t.]. Moscow: Statsoft. <http://www.StatSoft./home/textbook/default.htm>. Retrieved from <http://www.StatSoft./home/textbook/default.htm>.
7. Khalafian A. A. (2007). Statisticheskii analiz dannykh 3-e izdanie. [Statistical analysis of data 3-d edition]. Moscow: ООО «Binom-Press» [in Russian].
8. Borovikov V. A. (2003). Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere: dlia professionalov, 2-e izd. [The art of data analysis on the computer: for professionals, 2-nd edition]. Piter. [in Russian].
9. Medzhibozhskii M. Y. (1979). Osnovy termodinamiki i kinetiki staleplavil'nykh processov: Ucheb. posobie dlya vuzov. [Fundamentals of thermodynamics and kinetics of steel-smelting processes: tutorial for institutes of higher education]. Donetsk: Vishcha shkola. Golovnoe izd-vo. [in Russian].

Анотація

Бондар В. І., Мельник С. Г.

Дослідження фізико-хімічних процесів LD-конвертування із застосуванням статистичного метода

Наведено результати досліджень фізико-хімічних процесів виробництва сталі в двох паралельно працюючих LD-конверторах. Виконано дослідження значущості відмінності середніх значень хімічного складу розплаву і його температури в умовах LD-процесу. На основі даних про хімічний склад і температуру металевго розплаву, які одержані в умовах кисневого конвертування, з використанням пакету прикладних програм StatSoft Statistica 8.0 виконаний аналіз відмінності середніх для двох паралельно працюючих LD-конверторів.

Ключові слова

LD-конвертор, технологічні параметри, хімічний склад, температура, статистична значимість, нормальність розподілу, статистика, дисперсія.

Summary

Bondar V., Melnik S.

Research of phisico-chemical processes of LD-converting using statistical method

Results of researches of physical and chemical processes of steel manufacture in two parallel working LD converters are presented. On the research basis of the data on chemical composition and temperature of a metallic melt received in the conditions of oxygen converting with use of application of StatSoft Statistica 8.0 package the analysis of significance of distinction of averages for converters with the top purge is made.

Keywords

LD-converter, technological parameters, chemical composition, temperature, statistical significance, normal distribution, statistics, dispersion.

Поступила 16.08.16