

- Transportnye svoistva metallicheskih i shlakovykh rasplavov: spravochnik [Transport properties of metal and slag melts: reference book]. Moscow, Metallurgii Publ., 1995. 652 p. (Rus.)
6. Makurov S.L. Vysokotemperaturnyi viskozimetr s avtomaticheskoi registratsiei rezul'tatov izmerenii [High-temperature viscometer with automatic recording of measurement results]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi state technical university*, 1997, no. 3, pp. 37-40. (Rus.)
 7. Kazachkov E.A., Makurov S.L. Issledovanie viazkosti zhidkoi stali kapillarnym metodom [Investigation of the viscosity of liquid steel by the capillary method]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi state technical university*, 2002, no. 12, pp. 47-50. (Rus.)
 8. Makurov S.L. Eksperimental'noe i raschetnoe opredelenie temperatury likvidus slozhnolegirovannykh stali [Experimental and calculated determination of the liquidus temperature of complex alloy steels]. *Priazovs'kogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi state technical university*, 2003, no. 13, pp. 46-49. (Rus.)
 9. Makurov S.L., Kazachkov E.A. Izmereniia temperatury v nezatverdevshem iadre stal'nykh slitkov, otlivaemykh sifonnym sposobom [Measurements of temperature in the hard core of steel ingots, cast by siphon]. *Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 1978, no. 11, pp. 39-41. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 16.04.2018

УДК 669.184:519.22

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142512

© Бондарь В.И.,¹ Тарасюк Л.И.²

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ В КОНВЕРТЕРАХ С КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКОЙ

На основе данных о химическом составе и температуре металлического расплава, полученного в условиях кислородного конвертирования в конвертерах с комбинированной продувкой, и с использованием пакета прикладных программ StatSoftStatistica 8.0 получены линейные уравнения регрессии зависимости содержания углерода в расплаве от его температуры и химического состава. Произведен анализ достоверности модельных параметров этих зависимостей.

Ключевые слова: *металлический расплав, нормальность распределения, регрессионный анализ, достоверность модельных параметров.*

Бондарь В.И., Тарасюк Л.И. Дослідження процесу виробництва сталі у конвертерах із комбінованим продуванням. *Процес комбінованого продування використовується для переробки високофосфористих чавунів і застосовується в західноєвропейських країнах; в основному, це процес LBE (Lance Bubbling Equilibrium) з подачею кисню згори і нейтральних газів через дно. Технологія зазвичай передбачає продування в два періоди з проміжним зливом шлаку і залишенням шлаку другого періоду продування в конвертері. Таблиця початкових розрахункових даних була представлена результатами хімічного аналізу і температури металевого розплаву 51-ої плавки, отримано-*

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, bbvii.47@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, sstts@list.ru

го в конвертерах місткістю 300 т фірми Крупп-Шталь, і представлених в періодичній літературі. В якості незалежних змінних використовувалися вміст вуглецю в розплаві [C], марганцю [Mn], сірки [S], фосфору [P], активність кисню $a_{[O]}$, як показника міри окисленості металевого розплаву, і температура розплаву (T , °C). Перевірка відповідності розподілу значень змінних закону нормального розподілу за допомогою критерію Колмогорова-Смирнова показала, що в усіх випадках величина рівня значущості перевищує 5%, тому нульова гіпотеза про те, що розподіл відповідає нормальному закону, може бути прийнята. Рівняння лінійної регресії, яке встановлює можливість розрахунку значень змінної [C], показує, що вони визначаються значеннями змінних [P] і $a_{[O]}$. Коефіцієнти рівняння регресії, як і вільний член рівняння, значимі на 5%-му рівні значущості. Значення F-критерію рівняння регресії доводить її адекватність. Величина стандартної помилки визначення значень змінної [C] перевищує 5%-й рівень і дорівнює приблизно 12%. Це ілюструє високу міру розсіювання різниці між фактичними і прогнозованими значеннями залежної змінної. Графіки розподілу залишків регресійної моделі не підтверджують твердження про адекватність регресійного рівняння. Присутність нелінійного тренду регресійних залишків доводить необхідність переходу від лінійної моделі рівняння регресії до нелінійної для забезпечення надійного передбачення значень змінної [C] за результатами хімічного складу розплаву і його температури.

Ключові слова: металевий розплав, нормальність розподілу, регресійний аналіз, достовірність модельних параметрів.

V.I. Bondar, L.I. Tarasyuk. Investigation of the steelmaking process in converters with combined blowing. The process of the combined blowing is used for the processing of high-phosphorus cast-irons and is used in the West-European countries; mainly it being the LBE (Lance Bubbling Equilibrium) process with the oxygen blowing from above and neutral gases through the bottom. The technology usually involves two periods of blowing with the intermediate pouring out of slag and keeping the slag of the second period of blowing inside the converter. The table of the initial calculation data was presented by the results of the chemical analysis and the temperature of the metallic fusion of the 51-th melting, got in 300 t Krupp-Stahl converters and presented in periodic literature. The contents of carbon [C], manganese [Mn], sulphur [S], phosphorus [P], the activity of oxygen $a_{[O]}$, were used as independent variables and as an index of the oxidation of the metallic fusion and the temperature of the fusion (T , °C). Verification of accordance of variables values distribution to the law of normal distribution by means of Kolmogorov-Smirnov criterion shows, that in all the cases the significance level exceeds 5%, that is why the null-hypothesis that distribution conforms the normal law, can be accepted. The linear regression equation, which makes it possible to calculate the variable [C] values, shows that they are determined by the values of the variables [P] and $a_{[O]}$. The equation of regression coefficients, as well as the free member, become reliable at 5%-th level of reliability. The value of F-criterion of regression equation proves its adequacy. The standard error in determining the values of the variable [C] exceeds the 5%-th level and is about 12%. Making evident the high dispersion of difference between the actual and forecast values of the dependent variable. The distribution graphic of the rest of the regressive model does not confirm the adequacy of the regressive equation. The availability of nonlinear trend of the regressive equation leads to the necessity of the transition from the linear model of regression equation to nonlinear one to provide a reliable foresight of the variable [C] values on the chemical composition of the fusion and its temperature.

Keywords: metal melt, normal distribution, regression analysis, reliability of model parameters.

Постановка проблеми. Повышение эффективности кислородно-конвертерного производства стали непрерывно связано с проблемами разработки ресурсо- и энергосберегающей технологии конвертерной плавки, её автоматизации и управления процессом кислородного

конвертирования [1]. Основной задачей процесса выплавки стали в конвертерах различного типа является получение определённой запланированной марки стали с заданным химическим составом и температурой [2]. Конвертерный процесс характеризуется сложными, многофакторными взаимодействиями и связями, возникающими по ходу продувки сталеплавильной ванны. На кинетику окисления примесей оказывают влияние возмущения и управляющие воздействия, что имеют место во время продувки. В этой связи, для решения такой технологической задачи необходимо иметь рациональную модель расчета основных параметров плавки. Как известно, различают детерминированные, статистические и эвристические модели конвертерной плавки [1]. Тем не менее, если стабильность работы конвертера достигнута, то возможно создание надежной модели конвертерной плавки. В работе сделана попытка построения статистической модели конвертерной плавки, которая позволила бы статически управлять конвертерной плавкой. Успешное использование этой модели зависит, в первую очередь, от стабильности условий работы конвертера. Проверка стабильности работы конвертера может быть достигнута использованием приемов статистического анализа.

Анализ последних исследований и публикаций. Задача применения методов математической статистики заключается в том, чтобы заменить субъективную оценку производственного процесса объективными данными, полученными в результате измерения параметров процесса. Необходимость применения методов математической статистики обосновывается еще и тем, что современное развитие металлургии достигло такой стадии, при которой невозможно ограничиваться только качественным анализом. Последний необходимо дополнить количественным описанием процесса, которое позволит в совершенстве изучить его, а, следовательно, и управлять им. Эти обстоятельства являются одной из основных предпосылок для автоматизации металлургического производства.

В этой связи следует подчеркнуть, что уровень статистического анализа в полной мере зависит от количества и точности поступающей информации, характеризующей производственный процесс.

В настоящее время большое внимание уделяется анализу распределения случайных переменных, статистическим оценкам и проверкам гипотез, корреляционному и регрессионному методам анализа, а также другим методам статистической индукции.

Много работ посвящено применению статистических методов для анализа металлургического процесса. Основной целью этих работ является количественная оценка процессов, происходящих в сталеплавильных агрегатах, и выделение важнейших из них. Последние работы направлены на определение факторов, которые можно было бы регулировать, чтобы процесс протекал оптимально. Исследуются процессы обезуглероживания, дефосфорации и десульфурации, восстановления и другие [1-6].

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что статистические методы в большинстве случаев применяются для решения конкретных технологических вопросов. Что касается их использования с целью математического описания процессов, то оно ограничивается лишь частными случаями [7, 8]. Можно сказать, что до сих пор эти методы не использовались для полного описания всей производственной технологии, которая могла бы служить основанием для комплексной автоматизации производства.

Цель статьи – установление взаимосвязи важнейшей выходной переменной – содержания углерода в металлическом расплаве, достигнутом в результате кислородного конвертирования, с химическим составом расплава и его температурой. При этом необходимым условием является обеспечение максимальной точности и достоверности полученных результатов.

Для решения поставленной задачи использовался инструментарий программного пакета Statistica 8. Исходными данными для расчета послужили результаты оценки химического состава и температуры металлического расплава, полученного в результате кислородного конвертирования в конвертерах емкостью 300 т и оборудованных системой продувки расплава инертным газом. В общей сложности было проведено 60 измерений с использованием двух усовершенствованных фурм-зондов: «Кольб-ферротрон» (ТСР) и «Ферротрон» (ТР). Из 60 замеров 51 (85%) измерение дало положительные результаты. Ошибочными были 5 результатов вследствие неправильного вмонтирования зондов в фурмы [3]. Результаты измерений, выполненных зондами обеих типов, были практически одинаковыми. Быстродействие измерительного эле-

мента (6 с) оказалось вполне удовлетворительным.

Изложение основного материала. Процесс комбинированной продувки используется для переработки высокофосфористых чугунов и применяется в западноевропейских странах; в основном, это процесс ЛБЕ (Lance Bubbling Equilibrium) с подачей кислорода сверху и нейтральных газов через дно. Технология обычно предусматривает продувку в два периода с промежуточным сливом шлака и оставлением шлака второго периода продувки в конвертере. Преимуществом процесса по сравнению с донной продувкой является то, что вследствие большей скорости шлакообразования, требуемое низкое содержание фосфора в металле получают при несколько более высоком содержании углерода в металле, чем при донной продувке.

Находит применение разновидность подобной технологии, при которой после окончания второго периода продувки кислородом проводят кратковременную перемешивающую продувку аргоном, обеспечивающую дополнительную дефосфорацию, десульфурацию при одновременном окислении углерода и снижении содержания оксидов железа в шлаке. Результаты дополнительной продувки характеризуют следующие данные: останавливая кислородную продувку при содержании в металле 0,21% С, 0,026% Р и 0,019% S после двухминутной продувки аргоном, получали в стали 0,12% С, 0,013% Р и 0,015% S*.

Таблица исходных расчетных данных была представлена результатами химического анализа и температуры металлического расплава 51-й плавки, полученного в конвертерах емкостью 300 т фирмы Крупп-Шаль и представленных в периодической литературе [3]. В качестве независимых переменных использовались данные содержания углерода в расплаве [C], марганца [Mn], серы [S], фосфора [P], активности кислорода $a_{[O]}$, как показателя степени окисленности металлического расплава, и температуры расплава (T, °C).

Проверка соответствия распределения переменных нормальному распределению выполнена с помощью критериев Колмогорова-Смирнова (K-S), так называемой поправки Лиллиефорса и критерия Шапиро-Уилки (Shapiro-Wilk) [4]. Значения критериев сведены в таблицу их значений для каждой переменной (табл. 1). Значения d в тесте (K-S) означает максимальное расстояние между кривыми фактического и теоретического (нормального) распределения значений переменной. Эта величина соответствует уровню значимости p. Как известно, уровень значимости – это вероятность ошибочно отвергнуть нулевую гипотезу, то есть вероятность справедливости нулевой гипотезы при условии ее отвержения. Во всех рассмотренных случаях величина уровня значимости оказалась более 5%, поэтому нулевая гипотеза о том, что распределение всех переменных подчиняется нормальному закону, может быть принята. Вместе с тем, максимальное расстояние d между фактической и теоретической функциями распределения велико и находится в интервале значений 0,10-0,17, что не говорит в пользу принятой гипотезы. Значения уровня значимости поправки Лиллиефорса также не подтверждает однозначность вывода о принятии нулевой гипотезы о соответствии распределения значений обсуждаемых переменных нормальному закону.

Таблица 1

Значения критериев соответствия

Переменные	(T, °C)	[C]	[Mn]	[S]	[P]	[a_o]
Критерий Колмогорова-Смирнова	d = 0,10721 p > 0,20	d = 0,10858 p > 0,02	d = 0,10300 p > 0,20	d = 0,10525 p > 0,20	d = 0,12575 p > 0,20	d = 0,17260 p < 0,10
Уровень значимости поправки Лиллиефорса	p < 0,20	p < 0,15	p > 0,20	p < 0,20	p < 0,05	p < 0,01
Критерий Шапиро-Уилки	W = 0,97228 p = 0,27444	W = 0,91787 p = 0,00176	W = 0,96308 p = 0,11288	W = 0,95243 p = 0,03985	W = 0,91151 p = 0,00104	W = 0,81745 p = 0,00000

* Здесь и далее проценты массовые

Критерий Шапиро-Уилки обычно используют для массивов с небольшим числом набора наблюдений – до 50-ти. Он признан более мощным критерием по сравнению с критерием Колмогорова-Смирнова. Значения статистики Шапиро-Уилки во всех случаях близки к единице. Однако вероятность принятия нулевой гипотезы велика лишь для двух переменных – (T , °C) и [Mn]. Для остальных переменных нулевая гипотеза о том, что распределение их значений подчиняется нормальному закону, должна быть отвергнута.

Анализ диаграмм распределения значений переменных подтверждает сделанное ранее заключение о возможности принятия нулевой гипотезы о нормальном распределении значений лишь для переменных (T , °C) и [Mn]. Однако детальная проверка гипотезы о нормальности выборки требует довольно значительных объемов выборки (по мнению некоторых авторов, не менее 100 наблюдений).

В табл. 2 представлены выбранные для вычисления статистики. Приводятся значения объема выборки (Valid N), равные 51-ой плавке, значения среднего арифметического для каждой переменной (Mean), медианы (Median), минимального (Minimum) и максимального (Maximum) значений каждой переменной, значения верхнего (Lower-Quartile) и нижнего (Upper-Quartile) квантилей, дисперсии (Variance) – меры изменчивости, вариации переменной, значения стандартного отклонения (Std. Dev.), стандартной ошибки среднего (Standard Error), асимметрии (Skewness), стандартной ошибки асимметрии (Std. Err.-Skewness), эксцесса (Kurtosis) и его стандартной ошибки (Std. Err.-Kurtosis).

Таблица 2

Результаты расчета описательных статистик

Переменная	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower-Quartile	Upper-Quartile
T , °C	51	1609,9	1618,0	1536,00	1697,00	1579,000	1636,000
$a_{[O]}$, ppm	51	217,6	161,00	44,000	906,000	87,000	283,000
C , %	51	0,289	0,241	0,039	0,680	0,114	0,422
Mn , %	51	0,221	0,220	0,090	0,420	0,190	0,250
P , %	51	0,035	0,030	0,008	0,083	0,018	0,043
S , %	51	0,021	0,020	0,012	0,039	0,017	0,024

Продолжение табл. 2

Переменная	Variance	Std. Dev.	Coef. Var.	Standard Error	Skewness	Std. Err.-Skewness	Kurtosis	Std. Err.-Kurtosis
T , °C	1735,6	41,661	2,5878	5,83373	0,09512	0,333464	0,69032	0,655920
$a_{[O]}$, ppm	31214	176,67	81,1828	24,73962	1,83560	0,333464	4,0004	0,655920
C , %	0,04	0,1931	66,7521	0,02704	0,56750	0,333464	0,8700	0,655920
Mn , %	0,00	0,0597	26,9680	0,00836	0,63269	0,333464	1,7973	0,655920
P , %	0,00	0,0187	53,9867	0,00261	0,97594	0,333464	0,3252	0,655920
S , %	0,00	0,0060	28,8302	0,00085	0,79487	0,333464	0,6082	0,655920

Из данных табл. 2 следует, что величина дисперсии, являющаяся мерой изменчивости значения переменной, весьма велика для активности кислорода $a_{[O]}$ в металлическом расплаве – 31214 ppm при среднем значении этой переменной, равном 216,6 ppm. Дисперсия – один из существенных показателей, характеризующий явление или процесс, и один из основных критериев возможности создания достаточно точной статистической модели.

Для переменной «активность кислорода» велико и значение стандартного отклонения, показывающего на сколько в среднем отклоняются значения отдельных измерений от среднего значения признака. При среднем значении переменной $a_{[O]}$, равном 217,6, значение стандартного отклонения равняется 176,7. Велики значения стандартного отклонения для переменной [C] и несколько меньше для переменной [Mn]. Стандартное отклонение переменной $a_{[O]}$ наибольшее, что указывает на значительное отличие среднего значения этой переменной от среднего

значения генеральной совокупности при условии, что распределение близко к нормальному. Тот же вывод можно сделать и относительно переменной $[C]$. Для других переменных отличия в распределении их значений от нормального менее значимы.

В табл. 2 представлены также значения асимметрии, характеризующие степень смещения вариационного ряда относительно среднего значения. В симметричной кривой коэффициент асимметрии равен нулю. Во всех рассмотренных случаях коэффициент асимметрии больше нуля, что указывает на правостороннюю асимметрию в смещении вариационного ряда. Асимметрия переменной $(T, ^\circ\text{C})$ значительно меньше 0,5 и может быть признана малой. Асимметрия значений переменной $a_{[O]}$ выражена особенно ярко. Значение ее коэффициента асимметрии равно 1,84, что значительно превышает 0,5. Эти выводы находятся в полном соответствии с гистограммами распределения переменных.

В табл. 3 приведены расчетные значения коэффициента вариации (v) и относительной ошибки среднего (δ), рассчитанные из уравнений:

$$v = \frac{\text{Standard Deviation}}{\text{Mean}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\text{Standard Error Meran}}{\text{Mean}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Коэффициент вариации, как и стандартное отклонение, показывает меру изменчивости переменной. При величине коэффициента вариации до 10% изменчивость переменной оценивается как слабая, в интервале 11-25% – как средняя, а при значении большем, чем 25% – как сильная.

Таблица 3

Значения коэффициентов (v) и (δ)

Переменная	Коэффициент вариации (v), %	Относительная ошибка среднего значения (δ), %
$(T, ^\circ\text{C})$	2,59	0,36
$a_{[O]}$	81,19	11,37
$[C]$	66,82	9,36
$[Mn]$	20,66	3,78
$[S]$	28,57	4,05
$[P]$	53,43	7,46

Из данных табл. 3, можно заключить, что только изменчивость переменной $(T, ^\circ\text{C})$ может быть признана слабой, переменной $[Mn]$ – средней, а всех иных переменных – сильной. Наибольшее значение коэффициента вариации (v), равное 81,0%, отмечается для переменной $a_{[O]}$. Относительная ошибка среднего (δ) для переменной $(T, ^\circ\text{C})$ равна 0,36%, что менее 5%, поэтому точность определения значения этой переменной может быть признана хорошей. Несколько хуже точность определения значений переменных $[Mn]$ и $[S]$, но вполне приемлема. Точность определения значений переменных $[C]$ и $[P]$ признается удовлетворительной, что не может не сказаться на точности статистической модели.

Построение корреляционной матрицы необходимо для установления тесноты взаимосвязей между выбранными для анализа процесса конвертирования в конвертерах с комбинированной продувкой переменными. Корреляционная матрица представлена в табл. 4 и 5.

Как известно, коэффициенты корреляции, значения которых представлены в табл. 4 и 5, – это показатели, оценивающие тесноту линейной связи между признаками, то есть переменными [5]. Он может принимать значения от +1 до -1. Знак «-» означает, что связь обратная, а знак «+» – прямая. Чем ближе значение коэффициента к |1|, тем теснее связь. Связи переменных $[S]$ – $[Mn]$ и $[C]$ – $[Mn]$ оцениваются как слабые. Значение коэффициента корреляции в этом случае меньше 0,3. Умеренными характеризуются связи $(T, ^\circ\text{C})$ – $a_{[O]}$, $(T, ^\circ\text{C})$ – $[C]$, $(T, ^\circ\text{C})$ – $[Mn]$, $[Mn]$ – $a_{[O]}$ со значениями коэффициентов корреляции, находящимися в интервале значений от 0,31 до 0,50. Значительными являются связи переменных $[P]$ – $a_{[O]}$ и $[P]$ – $[Mn]$. Для этих связей значения коэффициентов корреляции находятся в интервале 0,51...0,70. Тесная связь характер-

на для переменных $[C]-a_{[O]}$ со значением коэффициента корреляции $-0,76$, что и определяет этот тип связи как тесную. Для практических целей следует использовать значительные, тесные и очень тесные связи. Очень тесная связь со значением коэффициента корреляции $\geq 0,91$ не обнаружена. Связи $(T, ^\circ C)-[P]$, $(T, ^\circ C)-[S]$, $a_{[O]}-[S]$ и $[C]-[S]$ оказались незначимыми.

Таблица 4

Корреляционная матрица

Переменная	$(T, ^\circ C)$	$a_{[O]}$	$[C]$	$[Mn]$	$[P]$	$[S]$
$(T, ^\circ C)$	1,00	0,33	-0,39	0,32	-0,03	-0,11
$a_{[O]}$	0,33**	1,00	-0,76	-0,49	-0,52	-0,15
$[C]$	-0,39	-0,76	1,00	0,29	0,61	0,27
$[Mn]$	0,32	-0,49	0,29	1,00	0,57	0,28
$[P]$	-0,03	-0,52	0,61	0,57	1,00	0,59
$[S]$	-0,11	-0,15	0,27	0,28	0,59	1,00

Таблица 5

Корреляционная матрица со значениями вероятности нулевой гипотезы (p)

Переменная	$(T, ^\circ C)$	$a_{[O]}$	$[C]$	$[Mn]$	$[P]$	$[S]$
$(T, ^\circ C)$	1,0000	0,3271	-0,3895	0,3249	-0,0333	-0,1061
	p = ---	p = 0,019	p = 0,005	p = 0,020	p = 0,817	p = 0,459
$a_{[O]}$	0,3271	1,0000	-0,7586	-0,4914	-0,5246	-0,1464
	p = 0,019	p = ---	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,305
$[C]$	-0,3895	-0,7586	1,0000	0,2907	0,6121	0,2739
	p = 0,005	p = 0,000	p = ---	p = 0,038	p = 0,000	p = 0,052
$[Mn]$	0,3249	-0,4914	0,2907	1,0000	0,5692	0,2801
	p = 0,020	p = 0,000	p = 0,038	p = ---	p = 0,000	p = 0,046
$[P]$	-0,0333	-0,5246	0,6121	0,5692	1,0000	0,5850
	p = 0,817	p = 0,000	p = 0,000	p = 0,000	p = ---	p = 0,000
$[S]$	-0,1061	-0,1464	0,2739	0,2801	0,5850	1,0000
	p = 0,459	p = 0,305	p = 0,052	p = 0,046	p = 0,000	p = ---

Корреляционный анализ тесно связан с регрессионным анализом, изучающим вид зависимости переменных (признаков), то есть параметры функций зависимости одного признака от одного или нескольких других признаков. В данной работе при использовании модуля «Регрессионный анализ» изучалась односторонняя зависимость переменной, в данном случае содержание углерода $[C]$ в металлическом расплаве после кислородного конвертирования в зависимости от температуры расплава $(T, ^\circ C)$, содержания марганца $[Mn]$, серы $[S]$, фосфора $[P]$ и активности в расплаве кислорода $a_{[O]}$. Переменная $[C]$ – функция отклика, а $[Mn]$, $[S]$, $[P]$ и $a_{[O]}$ – объясняющие переменные. Численные значения Regression Summary для функции отклика $[C]$ приводятся в табл. 6.

Таблица 6

Regression Summary для функции отклика $[C]$

Regression Summary for Dependent Variable: C, (% масс.) R = 0,83321681 R ² = 0,69425026 Adjusted R ² = 0,66027807 F(5,45) = 20,436 p < 0,00000 Std. Error of estimate = 0,11256						
	Beta	Std.Err.-of Beta	B	Std.Err.-of B	t(45)	p-level
Intercept			1,282791	0,785342	1,63342	0,109360
$(T, ^\circ C)$	-0,113181	0,112112	-0,000525	0,000520	-1,00953	0,318119
$a_{[O]}$	-0,606362	0,127039	-0,000663	0,000139	-4,77304	0,000020

** Полужирным шрифтом отмечены статистически значимые на 5%-ом уровне коэффициенты корреляции

Продолжение таблицы 6

[Mn]	-0,201493	0,129082	-0,651810	0,417567	-1,56097	0,125537
[P]	0,411437	0,130066	4,260055	1,346711	3,16330	0,002794
[S]	-0,011156	0,107874	-0,356515	3,447420	-0,10342	0,918093

Из данных табл. 6 следует, что переменными, существенно влияющими на [C], являются [P] и $a_{[O]}$. Переменные [S] и [Mn] не оказывают существенного влияния на значение [C]: значение p -уровня в этом случае – более 0,05. В этой связи они были исключены из пакета объясняющих переменных. Численные значения Regression Summary для функции отклика [C] после исключения представлены в табл. 7.

Таблица 7

Regression Summary для функции отклика [C] после исключения

Regression Summary for Dependent Variable: C, (% масс.) R = 0,79919078 R ² = 0,63870590 Adjusted R ² = 0,62365198 F(2,48) = 42,428 p < 0,00000 Std. Error of estimate = 0,11840						
	Beta	Std.Err.-of Beta	B	Std.Err.-of B	t(48)	p-level
Intercept			0,327216	0,055848	5,85901	0,000000
$a_{[O]}$	-0,603595	0,101906	-0,000660	0,000111	-5,92302	0,000000
[P]	0,295437	0,101906	3,058976	1,055149	2,89909	0,005628

Таким образом, в результате проведенного регрессионного анализа было получено следующее уравнение:

$$[C] = 0,327216 + 3,058976 \cdot [P] - 0,000660 \cdot a_{[O]}. \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии у значений переменных значимы, то есть переменные [P] и $a_{[O]}$ существенно влияют на значение [C], что подтверждается величиной p -уровня. Стандартизованные коэффициенты Beta позволяют провести ранжирование независимых переменных (предикторов) по степени их влияния на отклик. Из табл. 7 видно, что предикторы можно проранжировать в следующем порядке: $a_{[O]}$, [P], причем первый предиктор оказывает сильное влияние на отклик, а второй – умеренное. Значение F -критерия используется для проверки гипотезы о значимости регрессии. В данном случае значение F -критерия, равное 42,43, велико при уровне его значимости менее 0,05 и показывает, что построенная регрессионная модель высоко значима. Тем не менее, построенная модель объясняет лишь 63,9% ($R^2 = 0,639$) вариации зависимой переменной. Согласно общепризнанным требованиям, регрессионная модель должна объяснять не менее 80% вариации зависимых переменных (Дрейпер, Смит, 1981). Коэффициенты уравнения регрессии и его свободный член значимы на 5%-ном уровне. Стандартная ошибка оценки зависимой переменной по уравнению (3) не должна превышать 5%, но ее расчетное значение (Std. Error of estimate) – 11,8%. Стандартная ошибка модели показывает степень рассеяния разности между фактическим и прогнозируемым значениями переменной [C]. Поэтому уравнение (3) не позволяет с требуемой надежностью прогнозировать значение переменной [C].

Другой путь изучения вкладов каждой независимой переменной в предсказание зависимой состоит в вычислении частного (Partial cor.) и получастного коэффициентов корреляции (Semipart cor.) (табл. 8).

Таблица 8

Значения частных и получастных коэффициентов корреляции

Variables currently in the equation; DV : [C]							
	Beta in	Partial cor.	Semipart cor.	Tolerance	R-square	t(48)	p-level
$a_{[O]}$	-0,6036	-0,6498	-0,5139	0,7245	0,2752	-5,9230	0,0000
[P]	0,2954	0,3860	0,2515	0,7248	0,2752	2,8991	0,0056

Известно, что частные корреляции – это корреляции между соответствующими независимыми переменными, скорректированными относительно других переменных. Частные кор-

реляции представляют самостоятельный вклад соответствующей независимой переменной в предсказание зависимой. Получастные корреляции – это корреляции между соответствующей независимой переменной, скорректированной относительно других переменных, и исходной (не скорректированной) зависимой переменной. Другими словами, квадрат получастной корреляции является показателем доли в процентах общей дисперсии, самостоятельно объясняемой соответствующей независимой переменной. Квадрат частной корреляции является показателем доли в процентах остаточной дисперсии, учитываемой после корректировки зависимой переменной относительно независимых переменных [6].

Частные и получастные корреляции имеют близкие значения (табл. 8), то есть переменные $[P]$ и $a_{[O]}$ не имеют значительной «самостоятельной части» в объяснении изменчивости значения зависимой переменной $[C]$. Ранжирование независимых переменных по степени их влияния на значение переменной $[C]$: $a_{[O]}$, $[P]$, что соответствует представлениям о термодинамике и кинетике процесса окислительного рафинирования. В процессе кислородного конвертирования увеличение окисленности металлического расплава обеспечивает снижение концентрации углерода в металлическом расплаве.

После подбора уравнения регрессии необходимо получить предсказанные значения зависимой переменной и остатки. Остатки – это разность между опытными и предсказанными значениями зависимой переменной в построенной регрессионной модели. Вполне достаточно бывает и одного графического анализа остатков. О нормальном распределении остатков судят по графику остатков на нормальной вероятностной бумаге. Чем ближе распределение к нормальному, тем лучше значения остатков ложатся на прямую линию (рис. 1). В нашем случае распределение остатков нельзя признать вполне соответствующим нормальному распределению.

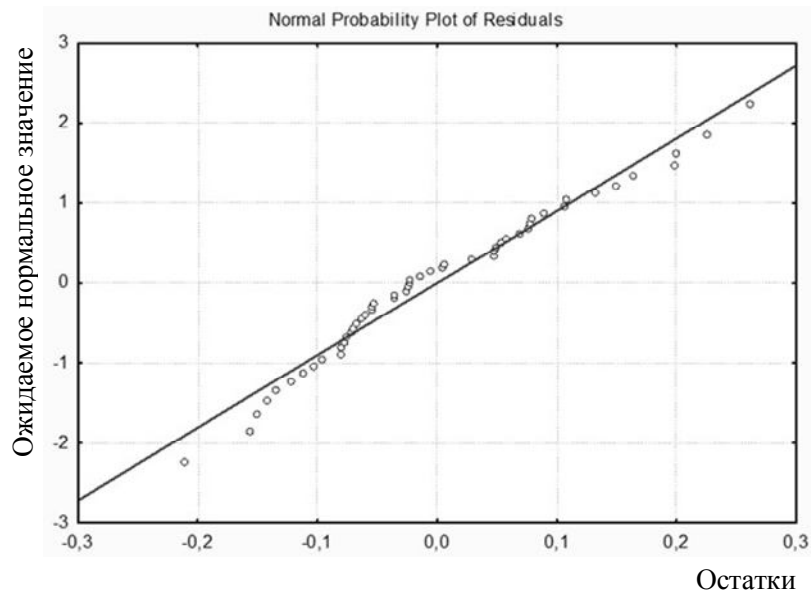


Рис. 1 – График остатков на нормальной вероятностной бумаге

Важно проанализировать остатки от каждой независимой переменной. Остатки должны быть нормально распределены, т. е. на графике они должны представлять приблизительно горизонтальную полосу одинаковой ширины на всем ее протяжении. Коэффициент корреляции между регрессионными остатками и переменными должен равняться нулю. На графике остатков, которые не приводятся, просматривается нелинейный тренд, что вызывает сомнение в адекватности модели. Присутствие нелинейного тренда в регрессионных остатках говорит о необходимости пересмотра модели (преобразования или ввода новых переменных, перехода от линейной модели к нелинейной).

На рис. 2 представлена иллюстрация визуальной оценки адекватности оценки построенной регрессионной модели путем графического изображения опытных и полученных по регрессионному уравнению значений зависимой переменной.

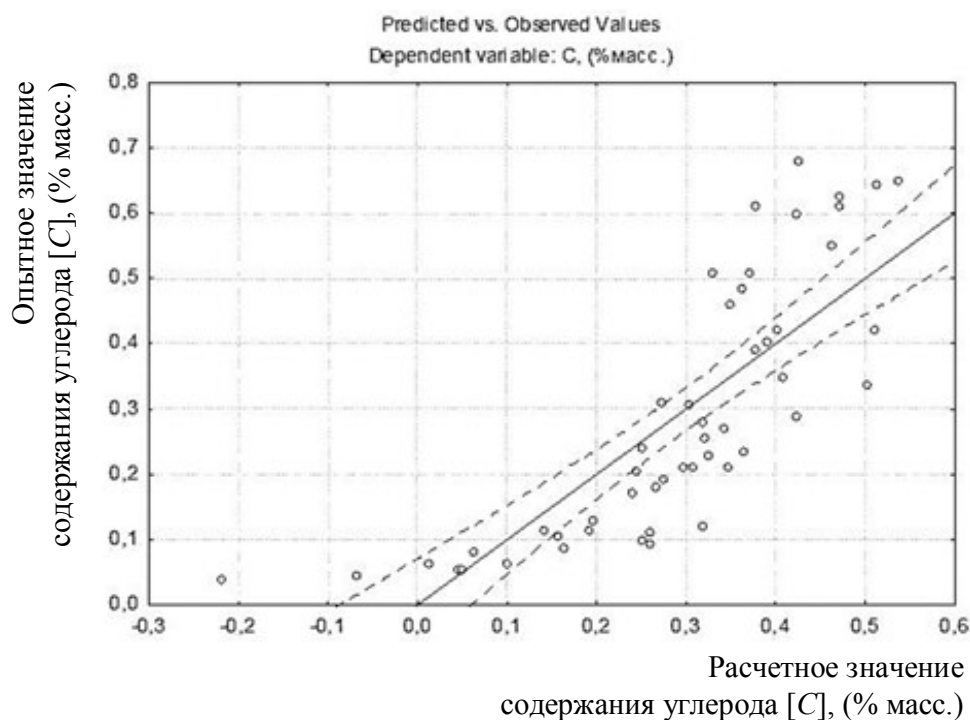


Рис. 2 – Визуализация наблюдаемых и расчетных значений содержания углерода

Очевидно, что линейный вид построенной модели неубедительно описывает взаимосвязь содержания углерода в расплаве от его окисленности ($a_{[O]}$) и содержания в нем фосфора (рис. 2). Эта связь носит нелинейный характер и требует дополнительного изучения.

Выводы

1. Проверка соответствия распределения значений переменных закону нормального распределения с помощью критерия Колмогорова-Смирнова показывает, что во всех случаях величина уровня значимости превышает 5%, поэтому нулевая гипотеза о том, что распределение соответствует нормальному закону, может быть принята. Однако значения критерия Шапиро-Уилки, наиболее соответствующего небольшому объему выборки, позволяет утверждать о состоятельности нормального распределения лишь для переменных (T , °C) и $[Mn]$. Уровень значимости поправки Лиллиефорса не подтверждает однозначность вывода о соответствии распределения значений переменных нормальному закону.
2. Установлено, что величина дисперсии, являющаяся мерой изменчивости значений переменной, весьма велика для переменной $a_{[O]}$, как и значение ее стандартного отклонения. Тот же вывод корректен и для переменной $[C]$. Для других переменных различия в распределении их значений от нормального менее значительны. Гистограммы распределения значений переменных подтверждают сказанное.
3. Для всех переменных коэффициент асимметрии в распределении их значений больше нуля, что указывает на правостороннюю асимметрию в смещении вариационного ряда относительно средних значений. Асимметрия значений переменной $a_{[O]}$ выражена особенно ярко – значение коэффициента асимметрии равно 1,84, что значительно превышает величину 0,5.
4. Значения коэффициента вариации (v) и относительной ошибки среднего значения (δ) позволяют утверждать, что наибольшая изменчивость значений переменной установлена для $a_{[O]}$ ($v = 81,0\%$), как и относительная ошибка среднего значения переменной ($\delta = 11,4\%$). Для других переменных значения коэффициента вариации и относительной ошибки могут быть признаны удовлетворительными.
5. Расчет значений коэффициентов парных корреляций показывает, что теснота связи $a_{[O]}$ – $[P]$ и $[P]$ – $[Mn]$ признается значительной и статистически значимой на 5%-м уровне. Связь $a_{[O]}$ – $[C]$ со значением коэффициента корреляции $-0,76$ признается тесной и значимой, а свя-

зи $(T, ^\circ\text{C})-[P]$, $(T, ^\circ\text{C})-[S]$, $a_{[O]}-[S]$ и $[C]-[S]$ оказались незначимыми. Остальные типы связей классифицируются как умеренные.

6. Уравнение линейной регрессии, устанавливающее возможность расчета значений переменной $[C]$, показывает, что значение этой переменной определяется значениями переменных $[P]$ и $a_{[O]}$. Коэффициенты уравнения регрессии, как и свободный член уравнения, значимы на 5%-м уровне значимости. Значение F -критерия уравнения регрессии доказывает ее адекватность.
7. Величина стандартной ошибки определения значения переменной $[C]$ превышает 5%-й уровень и равна примерно 12%. Это доказывает высокую степень рассеяния разности между фактическими и прогнозируемыми значениями зависимой переменной. Графики распределения остатков регрессионной модели не подтверждают утверждение об адекватности регрессионного уравнения. Присутствие нелинейного тренда регрессионных остатков доказывает необходимость перехода от линейной модели уравнения регрессии к нелинейной для обеспечения надежного предсказания значений переменной $[C]$ по результатам химического состава расплава и его температуры.

Список использованных источников:

1. Корнева А.А. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки / А.А. Корнева, М.Е. Корнет // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 10. – С. 24-28.
2. Воскобойников В.Г. Общая металлургия : учебник / В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Академкнига, 2002. – 764 с.
3. Фиге Л. Измерение в ходе продувки конвертера при помощи фурмы-зонда / Л. Фиге, Н.-Р. Кайзер. Й. Мах // Черные металлы. – 1994. – № 1. – С. 14-16.
4. Халафян А.А. СТАТИСТИКА 6. Статистический анализ данных : учебник / А.А. Халафян. – 3-е изд. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
5. Лакин Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин. – М. : Высшая школа, 1990. – 352 с.
6. Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Москва, 2007. – Режим доступа : <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. – Название с экрана.
7. Бондарь В.И. Исследование физико-химических процессов LD-конвертирования с применением статистического метода / В.И. Бондарь, С.Г. Мельник // Металл и литье Украины. – 2016. – № 7. – С. 11-17.
8. Бондарь В.И. Исследование процесса кислородного конвертирования методами математической статистики / В.И. Бондарь, Л.И. Тарасюк // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2016. – Вип. 33. – С. 21-33. – (Серія : Технічні науки).

References:

1. Korneva A.A., Kornet M.E. Nonparametric modeling of converter fusion]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaiia metallurgiiia – Izvestiia. Ferrous metallurgy*, 2013, no. 10, pp. 24-28. (Rus.)
2. Voskoboynikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obschaya metallurgiya* [General Metallurgy]. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 764 p. (Rus.)
3. Fige L., Kayzer N.-R., MahY. Izmerenie v hode produvki konvertera pri pomoschi furmyi-zonda [Measurement during purge of the converter with a tuyere probe]. *Cherneye metally – Ferrous metals*, 1994, no. 1, pp. 14-16. (Rus.)
4. Halafyan A.A. *STATISTICA 6. Statisticheskii analiz dannyih: uchebnik* [STATISTICA 6. Statistical analysis of data: a textbook]. Moscow, Binom-Press Publ., 2007. 512 p. (Rus.)
5. Lakin G.F. *Biometriya* [Biometrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 352 p. (Rus.)
6. *Elektronnyi uchebnik po statistike* (Electronic textbook on statistics) Available at: www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm (accessed 13 November 2017). (Rus.)
7. Bondar V.I., Melnik S.G. Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov LD-konvertirovaniia s primeneniem statisticheskogo metoda [Investigation of physical and chemical processes of LD

conversion with the use of the statistical method]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2016, no. 7, pp. 11-17. (Rus.)

8. Bondar V.I., Tarasyuk L.I. Issledovanie protsessa kislorodnogo konvertirovaniia metodami matematicheskoi statistiki [The study of the process of oxygen conversion by methods of mathematical statistics]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical science*, 2016, no. 33, pp. 21-33. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.04.2018

УДК 669.184.14

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142513

© Лухтура Ф.И.*

О СТЕПЕНИ УСВОЕНИЯ КИСЛОРОДА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВАННОЙ ПРИ ВЕРХНЕМ ВДУВЕ В LD-КОНВЕРТЕРЕ

Рассмотрены вопросы усвоения кислорода конвертерной ванной в период продувки во время взаимодействия кислородной струи с окружающей газовой средой и шлаком при ее истечении в полости конвертера верхнего дутья без учета дожигания конвертерных газов в шлаке и газовой полости конвертера. Показана зависимость степени усвоения от параметров истечения кислородного потока из сопел фурм верхнего дутья и других параметров продувки.

Ключевые слова: фурма, сопло, сверхзвуковой поток, кислород, конвертерные газы, эжекция, расплав.

Лухтура Ф.И. Про ступень засвоєння кисню металевою ванною при верхньому вдутті в LD-конвертері. Розглянуто причини та ступінь існуючого засвоєння конвертерною ванною дуттєвого потоку окисного газу (кисню) для рафінування розплаву в період продувки. Показано, що ступінь засвоєння кисню дуття металевою ванною пов'язана з фактом відображення периферійної частини кисневого струменя на її довжині від вихідного перетину сопла до поверхні металевого розплаву через наявність зустрічних потоків конвертерних газів в газовій порожнині конвертера і шару шлаку. При цьому ступінь засвоєння кисню через зазначені чинники зменшується на 5-35% в залежності від режимних параметрів, конструкції дуттєвих пристроїв, переносних властивостей надзвукових струменів високотемпературної газової порожнини конвертера із зустрічними потоками конвертерних газів і розплавів, від висоти розташування фурми над металевим розплавом та ін. На процес засвоєння також впливає режим взаємодії газового струменя з рідким розплавом при верхньому дутті, який різний при різній інтенсивності дуття і висоти розташування фурми – ламінарний, перехідний або турбулентний. Показано, що на режим взаємодії газу з розплавом, в свою чергу, впливає існуюча можливість передачі збурень з навколишньої атмосфери в струмінь. Наведено відповідні аналітичні співвідношення для визначення та приклади розрахунку ступеня засвоєння кисню металевим розплавом в 160-т і 350-т конвертерах верхнього дуття при взаємодії потоків окислювача з конвертерними газами і шлакометалевим розплавом. Встановлено, що в основний час продувки ступінь засвоєння кисню збільшується з ростом інтенсивності дуття, швидкості окислювача в ефективному (ізо-

* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь