

- Skrebtsova O.M.*) [The method of determining the number of atoms in the cluster metal melt (method Skryebtsova O.M.)]. Patent UA, no. 23458A, 2007. (Ukr.)
16. Ryzhikov A.A., Gavrilin I.V. Nekotorye osobennosti protsessov plavleniia i struktury zhidkikh metallov [Some features of the melting process and the structure of liquid metals]. *Progressivnaia tekhnologiia liteinogo proizvodstva – Advanced foundry technology*, 1969, pp. 3-10. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 20.10.2016

УДК 669.184:519.22

© Бондарь В.И.¹, Тарасюк Л.И.²

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

На основе данных о химическом составе и температуре металлического расплава, полученного в условиях кислородного конвертирования с использованием пакета прикладных программ StatSoft Statistica 8.0, установлены односторонние зависимости отклика содержания углерода в расплаве от температуры расплава и его химического состава. Рассчитаны линейные уравнения регрессий зависимостей между объясняемой и объясняющими переменными и произведен анализ достоверности модельных параметров этих зависимостей.

Ключевые слова: регрессионный анализ, нормальность распределения, отклик, форма зависимости, достоверность модельных параметров.

Бондарь В.И., Тарасюк Л.И. Дослідження процесу кисневого конвертування методами математичної статистики. На основі даних про хімічний склад і температуру металевого розплаву, отриманого в умовах кисневої конвертації з використанням пакету прикладних програм StatSoft Statistica 8.0, встановлені односторонні залежності відгуку вмісту вуглецю в розплаві від температури розплаву та його хімічного складу. Розраховані лінійні рівняння регресій між з'ясовною і пояснюючими змінними і зроблений аналіз достовірності модельних параметрів цих залежностей.

Ключові слова: регресійний аналіз, нормальність розподілу, відгук, форма залежності, достовірність модельних параметрів.

V.I. Bondar, L.I. Tarasyuk. Research of process of the oxygen converting by the methods of mathematical statistics. An array of 177 meltings of the oxygen converter shop of Azovstal plant was formed for the analysis. The dependent variable is the carbon content [C] in the molten metal and independent variables being manganese [Mn], phosphorus [P] and sulphur [S] content, oxygen activity $a_{[O]}$ and the melt temperature (T , °C). After excluding the variables that do not affect the value of [C], (T , °C), [Mn] and $a_{[O]}$ were found to be significant. The constructed model $[C] = f([Mn], a_{[O]}(T, °C))$ is adequate: the value of the Fisher criterion is – 42,06 with the significance level much less than 0,05. The introduction of the additional variable «converter» did not result in a significant improvement of the regression model – the value of the specified regression coefficient increased from 0,41 to 0,45. Histogram of the distribution of the remainders for the ob-

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

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

tained model indicate the lack of a normal distribution. Analysis of the data sets separately for the first and second converters has significantly increased the value of the specified regression coefficient up to 0,85 for the first converter, but reduced to 0,20 for the second convertor. In this case the variable (T, °C) in the regression equation for the second converter turned out to be insignificant. Graphs of the dependence of the remainders for each independent variable on the values of the variable are characterized by a nonlinear trend, indicating lack of normal distribution. Graphical illustrations of the remainders distribution for the first and second converters are alike. However, the correlation coefficient of the remainders and variables values is at the level of $10^{-7} \dots 10^{-8}$, indicating the adequacy of the obtained models. Thus, the results of the analysis indicate that kinetic regularities of physico-chemical processes in the first converter are substantially different from the second. The prediction probability values of the variable [C] in accordance with the obtained regression equations confirmed for the first Converter and no for the second.

Keywords: *regressive analysis, normal distribution, form of dependence, authenticity of model parameters.*

Постановка проблеми. Развитие современного металлургического производства и машиностроения требует разностороннего изучения кинетики процесса кислородного конвертирования. Создание детерминированной модели кислородно-конвертерной плавки не представляется возможным ввиду термодинамической ее нестабильности. Весьма эффективным способом исследования подобных неравновесных систем является статистический метод.

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. 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. Целью настоящей работы явилось установление односторонней зависимости отклика – содержания углерода в металлическом расплаве после кислородного конвертирования из данных химического состава расплава и его температуры. При этом необходимым условием являлось обеспечение максимальной точности и достоверности полученных результатов. Для решения поставленной задачи использовались возможности регрессионного анализа программного пакета Statistica 8.

Изложение основного материала. При использовании модуля «Регрессионный анализ» изучается односторонняя зависимость переменной, в данном случае содержание углерода $[C]$ в металлическом расплаве после кислородного конвертирования от температуры расплава (T , °C), содержания марганца $[Mn]$, $[S]$, $[P]$ и активности в расплаве кислорода $a_{[O]}$. Переменная $[C]$ – функция отклика, а $[Mn]$, $[S]$, $[P]$ и $a_{[O]}$ – объясняющие переменные.

На начальной стадии исследования был составлен массив данных от 177 плавов, выплавленных первым и вторым конвертерами ККЦ ПАО «МК «Азовсталь». Численные значения Regression Summary для функции отклика $[C]$ приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Regression Summary для функции отклика $[C]$

Regression Summary для функции отклика $[C]$: $R = 0,64499545$; $R^2 = 0,41601913$; $R^2_{Adj} = 0,3992250$; $F(5,177) = 25,218$; $p = 0,0000$; Std.Error of estimate:0,0630832						
	Beta	Std. - Err. of Beta	B	Std. Err. – of B	t (177)	p – level
Intecept			0,241307	0,0630893	3,82522	0,000181
$(T, ^\circ C)$	- 0,208315	0,067762	- 0,000118	0,000038	- 3,07424	0,002445
$[Mn], \%*$	0,322879	0,060040	0,113689	0,024860	5,37769	0,000000
$[S], \%$	0,023991	0,057786	0,083443	0,200981	0,41518	0,678514
$[P], \%$	0,002877	0,059051	0,152690	0,313403	0,04872	0,961197
$a_{[O]}, ppm$	- 0,403070	0,068218	- 0,000016	0,000003	- 5,9080	0,000000

* Здесь и далее проценты массовые.

Из данных табл. 1 следует, что переменными, существенно влияющими на $[C]$, являются: $(T, ^\circ C)$, $[Mn]$, $a_{[O]}$. Переменные $[S]$ и $[P]$ 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. 2. Таким образом, в результате проведенного регрессионного анализа было получено следующее уравнение:

$$[C] = 0,240873 - 0,000117 (T, ^\circ C) + 0,133 [Mn] - 0,000016 a_{[O]}. \quad (1)$$

Таблица 2

Regression Summary для функции отклика $[C]$ после исключения переменных $[P]$ и $[S]$

Regression Summary для функции отклика $[C]$: $R = 0,64455139$; $R^2 = 0,41544649$; $R^2_{Adj} = 0,40564951$; $F(3,177) = 42,406$; $p = 0,0000$; Std.Error of estimate:0,0620120						
	Beta	Std. - Err. of Beta	B	Std. Err. – of B	t (177)	p – level
Intecept	-	-	0,240873	0,062012	3,88430	0,000144
$(T, ^\circ C)$	- 0,206505	0,066871	- 0,000117	0,000038	- 3,08810	0,002335
$[Mn], \%$	0,321268	0,059602	0,133022	0,024678	5,39026	0,000000
$a_{[O]}, ppm$	- 0,403599	0,067318	- 0,000016	0,000003	- 5,99545	0,000000

Коэффициенты регрессии у значений переменных значимы, то есть переменные $(T, ^\circ C)$, $[Mn]$ 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. 2 видно, что предикторы можно проранжировать в следующем порядке: $a_{[O]}$, $[Mn]$, $(T, ^\circ C)$, причем первый предиктор оказывает сильное влияние на отклик, а два других – умеренное. Значение F -критерия используется для проверки гипотезы о значимости регрессии. В данном случае значение F -критерия, равное 42,41, велико при уровне его значимости менее 0,05 и показывает, что построенная регрессионная модель высоко значима. Тем не менее, построенная модель объясняет лишь 40,6% ($R^2 = 0,415$) вариаций 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 (1) не должна превышать 5%. Ее расчетное значение (Std. Error of estimate) – 6,2%, что не соответствует общепринятым требованиям.

Важно провести всесторонний анализ остатков регрессионного уравнения (1). Остатки – это разности между опытными и предсказанными значениями зависимой переменной [C] в построенной регрессионной модели. Вполне достаточно лишь графического анализа остатков. О нормальности распределения остатков судили по графику остатков на нормальной вероятностной бумаге (рис. 1). Чем ближе распределение к нормальному виду, тем «легче» значения остатков должны ложиться на прямую линию.

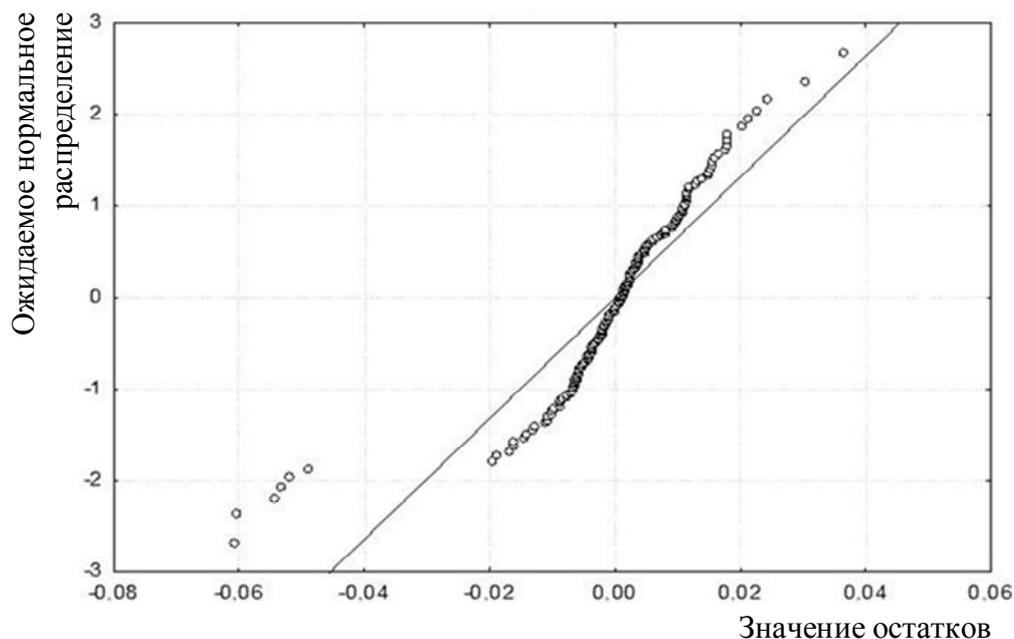


Рис. 1 – График остатков на нормальной вероятностной бумаге

График (рис. 1) показывает, что весь массив опытных точек далеко отстоит от прямой, которая проведена в соответствии с законом нормального распределения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассмотренная совокупность экспериментальных точек аномальна.

Важно также проанализировать графики зависимости остатков для каждой независимой переменной. Как уже оговаривалось, остатки должны быть нормально распределены, то есть на графике функции «остатки – переменная» они должны представлять приблизительно горизонтальную полосу одинаковой ширины на всём ее протяжении. Коэффициент корреляции (r) между регрессионными остатками и переменной должен равняться нулю.

Графики представлены на рис. 2-4. Нелинейный тренд значений остатков для всех переменных подтверждает сомнения в адекватности полученной модели и указывает на необходимость ее преобразования – ввода новых переменных и, возможно, к переходу от линейной к нелинейной регрессии.

В завершение представляется интересной визуализация эффекта совпадения опытных и рассчитанных по уравнению (1) значений зависимой переменной, то есть концентрации углерода в расплаве [C] (рис. 5). Расположение наблюдаемых значений переменной [C] не совпадает с их расположением, рассчитанным по уравнению (1). Таким образом, уравнение (1) не может быть использовано для прогноза содержания углерода в расплаве по данным его химического анализа.

Ввод дополнительной переменной «конвертер» не приводит к существенному улучшению показателей уравнения регрессии (табл. 3). Уравнение регрессии имеет вид:

$$[C] = 00,257453 - 0,000118(T, \text{ }^\circ\text{C}) + 0,110360[Mn] - 0,000017a_{[O]} - 0,007613 (\text{КОНВ}). \quad (2)$$

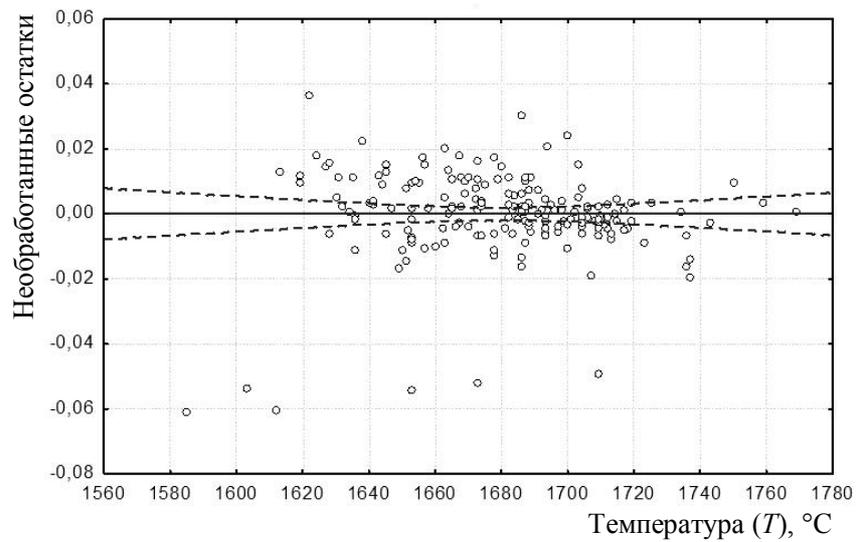


Рис. 2 – Значения остатков переменной (T) от температуры

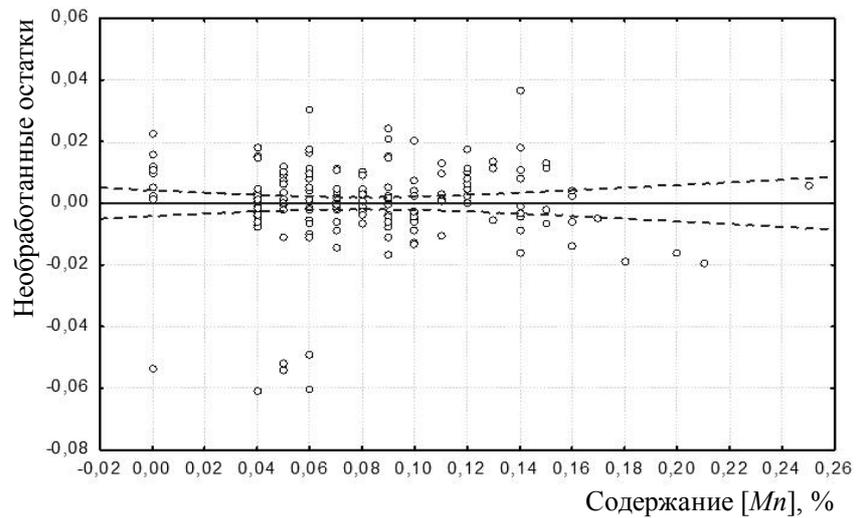


Рис. 3 – Значения остатков переменной [Mn] от содержания марганца

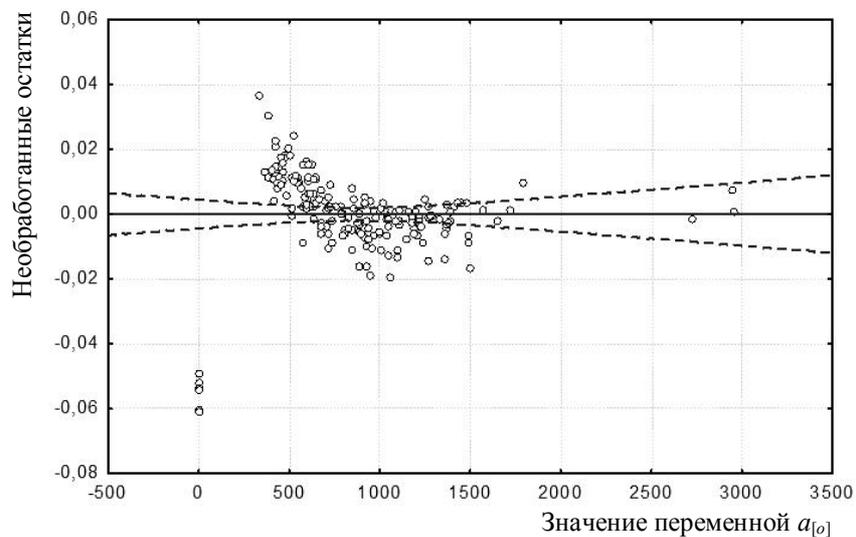


Рис. 4 – Значения остатков переменной $a_{[O]}$ от активности кислорода

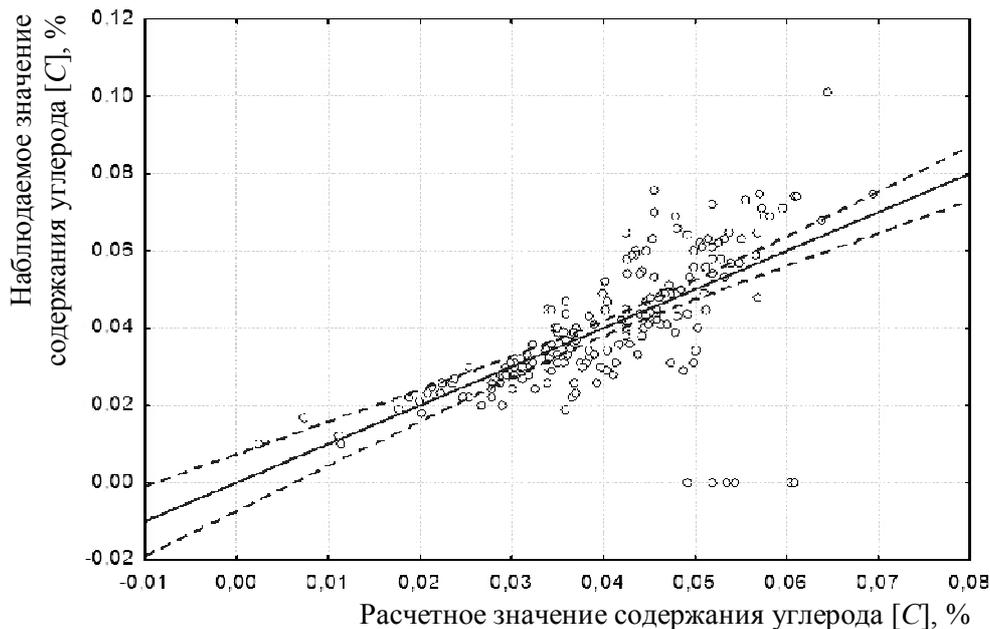


Рис. 5 – Визуализация наблюдаемых и расчетных значений содержания углерода [C], %

Таблица 3

Regression Summary для функции отклика [C] с новой переменной «конвертер (КОНВ)»

Regression Summary для функции отклика [C]: $R = 0,670099$; $R^2 = 0,45834225$; $R^2_{Adj} = 0,44617017$; $F(3,177) = 37,665$; $p = 0,00000$; Std.Error of estimate:0,0600627						
	Beta	Std.Err.of Beta	B	Std. Err. – of B	$t(177)$	$p - level$
Intercept	–	–	0,257453	0,060023	4,28920	0,000029
$(T, ^\circ C)$	– 0,208984	0,064555	–0,000118	0,000037	– 3,23731	0,001439
$[Mn], \%$	0,266536	0,059352	0,110360	0,024575	4,49076	0,000013
$a_{[O]}, ppm$	– 0,427991	0,065306	– 0,000017	0,000003	– 6,55359	0,000000
(КОНВ)	– 0,214795	0,057210	– 0,007613	0,002028	– 3,75452	0,000235

На рис. 6 представлены графики распределения остатков этой регрессионной модели. Очевидно, что распределение остатков этой регрессионной модели не соответствует представлениям о нормальном распределении. Стандартная ошибка оценки зависимой переменной по уравнению (2) превышает 5%-ный уровень.

Следующий шаг анализа состоял в разделении массива из 177-и плавков на два независимых массива. В первом массиве были собраны плавки от первого (85 плавков) конвертера (Конв_1), а во втором (91 плавка) – от второго (Конв_2). Значения коэффициентов регрессии для массива (Конв_1) представлены в табл. 4, а уравнение регрессии имеет вид (3):

$$[C] = 0,384823 - 0,000192 \cdot (T, ^\circ C) + 0,089404 \cdot [Mn] - 0,000024 \cdot a_{[O]}. \quad (3)$$

Общая характеристика уравнения (3) и данных табл. 4 таковы, что разделение массива на два подмассива существенно увеличило значение коэффициента регрессии (R^2) при условии сохранения адекватным уравнения регрессии. Коэффициенты уравнения (3) значимы, а стандартная ошибка определения значения переменной [C] не превышает 5%-ный уровень. На рис. 7-9 представлены распределения остатков для каждой из переменных уравнения регрессии (3).

Картина распределения остатков для указанных переменных и входящих в уравнение (3) существенно не изменилась по сравнению с предыдущим случаем. Горизонтальная полоса их распределения не обозначается, хотя коэффициент корреляции пар «остаток – значение переменной» близок к нулю. Несколько убедительнее, чем в случае массива переменных для двух

конвертеров, виглядит зависимость наблюдаемых значений переменной [C] в зависимости от ее расчетных значений (рис. 10).

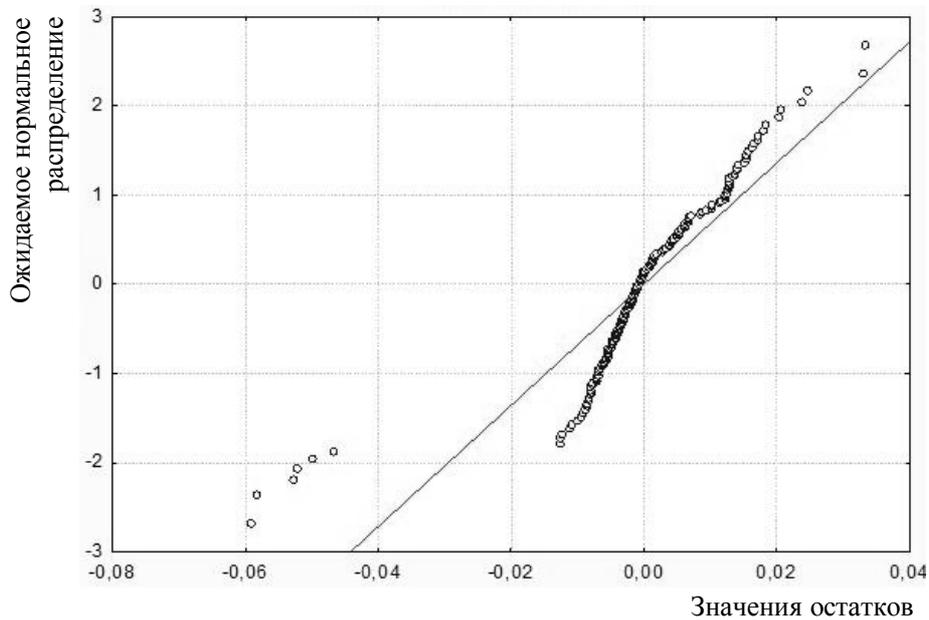


Рис. 6 – График остатков на нормальной вероятностной бумаге

Таблица 4

Regression Summary для функции отклика [C] для первого конвертера (Конв. 1)

Regression Summary для функции отклика [C]: $R = 0,92700708$; $R^2 = 0,85934213$; $R^2_{Adj} = 0,85437773$; $F(3, 85) = 173,10$; $p = 0,000000$; Std.Error of estimate: 0,0059446

	Beta	Std.Err.of Beta	B	Std. Err. – of B	t (177)	p – level
Intercept	–	–	0,384823	0,044843	8,5816	0,000000
(T, °C)	-0,322256	0,045769	-0,000192	0,000027	-7,0410	0,000000
[Mn], %	0,266523	0,045781	0,089404	0,018069	4,9480	0,000004
$a_{[O]}$, ppm	-0,635414	0,050562	-0,000024	0,000002	-12,5671	0,000000

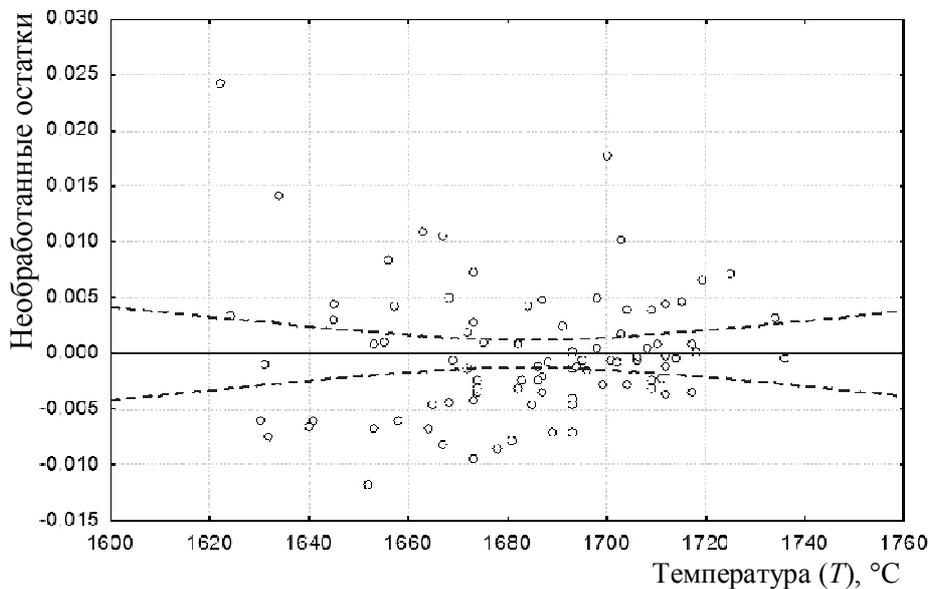


Рис. 7 – Значения остатков переменной (T) от температуры

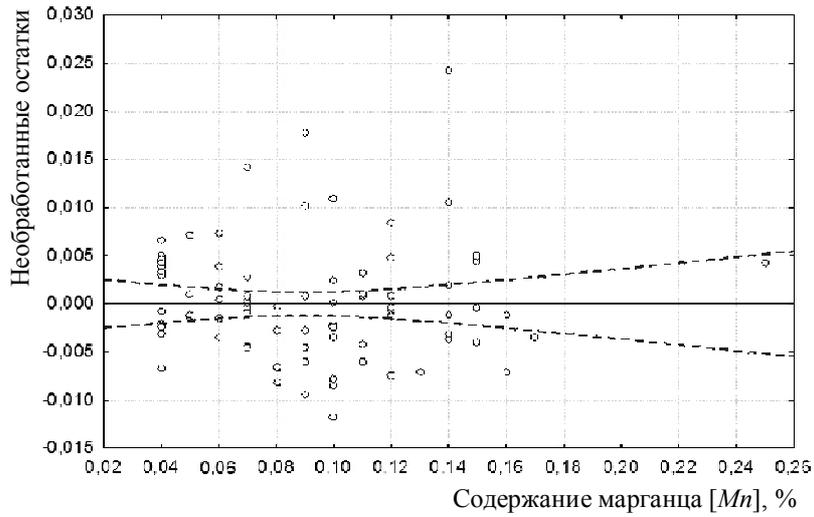


Рис. 8 – Значения остатков переменной $[Mn]$ от содержания марганца

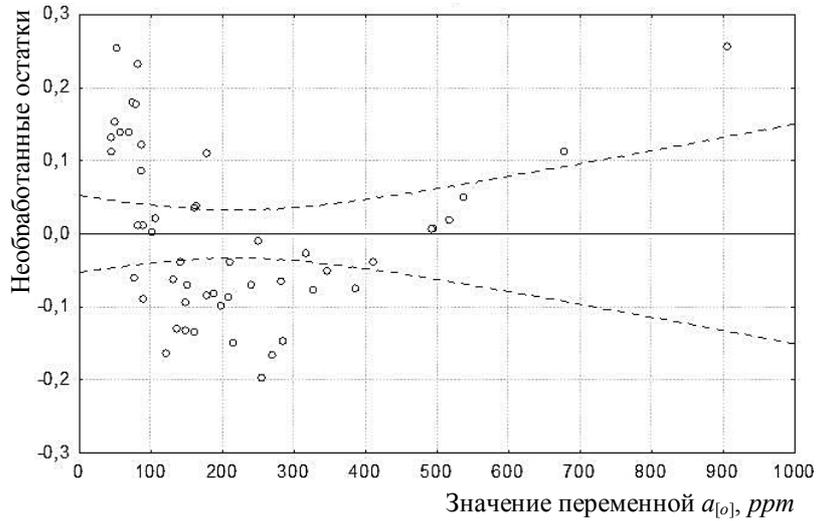


Рис. 9 – Значения остатков переменной $a_{[O]}$ от активности кислорода

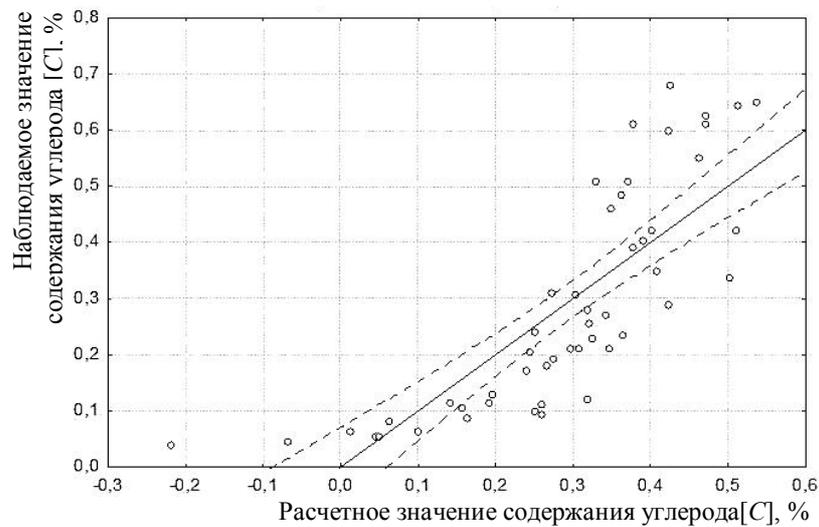


Рис. 10 – Визуализация наблюдаемых и расчетных значений содержания углерода $[C]$, %

Значения коэффициентов регрессии для массива (Конв_2) представлены в табл. 5, а уточненное уравнение регрессии имеет вид (4):

$$[C] = 0,0444 + 0,080011 \cdot [Mn] - 0,000016 \cdot a_{[O]}. \quad (4)$$

Таблица 5

Regression Summary для функции отклика [C] для второго конвертера (Конв_2)

Regression Summary для функции отклика [C]: $R = 0,470334816$; $R^2 = 0,22122739$; $R^2_{Adj} = 0,20411151$; $F(2, 91) = 12,93$; $p < 0,000000$; Std.Error of estimate: 0,16815925						
	Beta	Std.Err.of Beta	B	Std. Err. – of B	t (177)	p – level
Intercept	–	–	0,384823	0,044843	8,5816	0,000000
[Mn], %	0,266523	0,045781	0,089404	0,018069	4,9480	0,000004
$a_{[O]}$, ppm	– 0,635414	0,050562	– 0,000024	0,000002	–12,5671	0,000000

Обращает внимание тот факт, что переменная ($T, ^\circ C$) не оказывает значимого влияния на значение переменной [C] – уровень значимости соответствующего коэффициента регрессии значительно превышает величину 0,05. Переменные $a_{[O]}$ и [Mn] существенно влияют на значение переменной [C] и являются значимыми. Уточненный коэффициент регрессии для уравнения (4) значительно меньше, чем для (3): 0,20 против 0,85, то есть имеются неучтенные параметры либо регрессия нелинейна. На основании полученной информации можно констатировать, что кинетические закономерности термодинамических процессов во втором конвертере отличаются от происходящих в первом. Со всей уверенностью можно утверждать, что массообменные процессы при продувке расплавов в обоих конвертерах существенно отличаются.

Графическая иллюстрация распределения остатков для каждой из переменных в случае второго конвертера существенно не отличается от аналогичных для первого, и приводятся на рис. 8, 9. Однако оснований для практического использования уравнения регрессии (4) для предсказания ожидаемых значений переменной [C] не имеется (рис. 10).

Нелинейный тренд значений остатков во всех рассмотренных случаях вызывает необходимость коррекции при выборе переменных. В этом случае удобно воспользоваться значениями частных коэффициентов корреляций. Они показывают степень влияния одного предиктора на отклик в предположении, что остальные предикторы закреплены на постоянном уровне, то есть контролируют их влияние на отклик. Значения парных (стандартизованных) коэффициентов корреляции (Beta), частных (Partial Cor.) и получастных коэффициентов корреляции (Semipart Cor.) для всех рассмотренных моделей приведены в табл. 6-8. Их величины позволяют проводить ранжирование предикторов по степени их влияния на отклик. Кроме того, частные коэффициенты корреляции широко используются при решении проблемы отбора предикторов – целесообразности включения того или иного предиктора в модель определяется величиной частного коэффициента корреляции.

Таблица 6

Значения коэффициентов для модели «первый и второй конвертеры»

Variables currently in the equation; DV : [C], %							
	Beta in	Partial cor.	Semipart cor.	Tolerance	R-square	t(179)	p-level
$T, ^\circ C$	– 0,2065	– 0,2249	– 0,1765	0,7303	0,2697	– 3,0881	0,0023
[Mn], %	0,3213	0,3737	0,3080	0,9193	0,0807	5,3903	0,0000
$a_{[O]}$, ppm	– 0,4036	– 0,4089	– 0,3426	0,7206	0,2794	– 5,9955	0,0000

Во всех рассмотренных случаях наибольшим значением как стандартизованного, так и частного коэффициентов корреляции, характеризуется величина активности кислорода в металлическом расплаве, что соответствует представлениям о кинетике процесса окислительного рафинирования. В процессе кислородного конвертирования увеличение окисленности метал-

лического расплава обеспечивает снижение концентрации углерода в металлическом расплаве. Следует заметить, что существует связь между переменными $[C]$ и $(T, ^\circ C)$ для первого конвертера, но она незначима для второго конвертера. Таким образом, наличие тесной связи между переменными в одном случае (Конв_1) не является обязательным условием ее наличия для условий (Конв_2). Возможно для условий конвертирования для (Конв_2) эта связь имеет нелинейный характер. Теснота связи переменных $[C]$ и $[Mn]$ значительно слабее, чем в случае связи $[C] - a_{[O]}$ как для первого, так и для второго конвертера, о чем свидетельствуют значения стандартизованных и частных коэффициентов корреляции (табл. 6-8).

Таблица 7

Значения коэффициентов для модели «первый конвертер»

Variables currently in the equation; DV : $[C]$, %							
	Beta in	Partial cor.	Semipart cor.	Tolerance	R-square	t(85)	p-level
$T, ^\circ C$	-0,3223	-0,6069	-0,2864	0,7899	0,2100	-7,0410	0,0000
$[Mn]$, %	0,2265	0,4729	0,2013	0,7895	0,2105	4,9480	0,0000
$a_{[O]}$, ppm	-0,6354	-0,8063	-0,5112	0,6473	0,3527	-12,5671	0,0000

Таблица 8

Значения коэффициентов для модели «второй конвертер»

Variables currently in the equation; DV : $[C]$, %							
	Beta in	Partial cor.	Semipart cor.	Tolerance	R-square	t(91)	p-level
$[Mn]$, %	0,1858	0,2058	0,1856	0,9976	0,0024	2,0061	0,0478
$a_{[O]}$, ppm	-0,4231	-0,4319	-0,4226	0,9976	0,0024	-4,5682	0,0000

В табл. 6-8 приведены значения и получастных корреляций (Semipart Cor.). Получастные корреляции – это корреляции предиктора и отклика (концентрации углерода в металлическом расплаве) в предположении, что контролируется влияние других предикторов на данный, но не контролируется влияние предикторов на отклик. Если получастные коэффициенты значительно меньше частных, как в случае первого конвертера для переменной $(T, ^\circ C)$ (табл. 7), то последняя может иметь самостоятельную «часть» в объяснении изменчивости концентрации углерода, то есть такую часть, которая не объясняется влиянием других предикторов.

Значения коэффициентов детерминации ($R - square$), что приведены в табл. 6-8, – квадрат коэффициента множественной корреляции между данной переменной и всеми остальными переменными, входящими в уравнение регрессии, особенно малы в случае второго конвертера. Их значения для переменных $[Mn]$ и $a_{[O]}$ примерно на два порядка меньше, чем в случае второго конвертера. Как следует из табл. 6-8, все частные коэффициенты корреляции значимы, однако величины коэффициентов детерминации указывают на необходимость использования иных подходов к построению регрессионных моделей, используя, например, приемы непараметрической статистики.

Выводы

1. В результате обработки объединенного массива экспериментальных данных о характеристиках металлического расплава, полученного от двух конвертеров, установлено, что переменными, значимо влияющими на содержание углерода в расплаве, являются температура расплава $(T, ^\circ C)$, содержание марганца $[Mn]$, и активность кислорода в расплаве $a_{[O]}$. Уравнение линейной регрессии значимо, однако оно объясняет лишь 40,6% вариации зависимой переменной. Коэффициенты регрессии этого уравнения значимы на 5%-ном уровне. Расчетные значения стандартной ошибки оценки зависимой переменной превышает на 1,2% общепринятые значения.

2. Совокупность экспериментальных значений параметров объединенного массива не подчиняется закону их нормального распределения. Нелинейный тренд значений остатков для вышеуказанных переменных подтверждает неадекватность полученной регрессионной модели.

3. Разделение массива на два относительно независимых, каждый из которых охватывает параметры плавки для каждого из двух отдельно взятых конвертеров, существенно повлиял на результаты анализа. Установлено, что уравнение линейной регрессии для первого конвертера, включая те же независимые переменные, увеличило значение уточненного коэффициента регрессии до 0,85 по сравнению со значением 0,45. Коэффициенты уравнения значимы, а стандартная ошибка определения значения переменной не превышает 5%. Такое уравнение может быть рекомендовано для прогнозирования значения переменной [C].

4. Регрессионное уравнение, полученное при обработке данных о плавках второго конвертера, показывает, что переменная (T , °C) не оказывает значимого влияния на величину переменной [C]: уровень значимости соответствующего коэффициента регрессии значительно превышает величину 0,05. Уточненный коэффициент регрессии равен 0,20. Графические иллюстрации остатков для каждой переменной для обоих конвертеров однозначны. Прогнозирование значения переменной [C] по полученному регрессионному уравнению не представляется возможным.

5. Нелинейный тренд значений остатков отмечается во всех рассмотренных случаях. Наибольшим значением как парного, так и частного коэффициентов корреляции, является величина активности кислорода в металлическом расплаве. Теснота связи [C]-(T , °C) и [C]-[Mn] оказывается значительно слабее. Все частные коэффициенты корреляции значимы. Значения коэффициентов детерминации особенно малы для второго конвертера – различия составляют примерно два порядка. Это указывает на необходимость иных подходов к построению регрессионных моделей – переходу к модулю непараметрической статистики.

Список использованных источников:

1. Кнотек М. Анализ металлургических процессов методами математической статистики / М. Кнотек, Р. Войта, И. Шефиц. – М. : Металлургия, 1968. – 212 с.
2. Гасик М.М. Математический анализ экспериментальных данных электропроводности шлаковых расплавов системы MnO-SiO₂-CaO производства марганцевых ферросплавов / М.М. Гасик, В.С. Куцин, М.И. Гасик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 2. – С. 32-37.
3. Новый подход к интегральной оценке общего уровня исполнения технологии и достижения качества продукции на основе статистических методов / В.М. Салганик [и др.] // Металлург. – 2014. – № 4. – С. 103-106.
4. Статистическое управление процессами производства ферросплавов и модификаторов чугуна / Л.Ф. Первов [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 3(67). – С. 120-125.
5. Корнеева А.А. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки / А.А. Корнеева, М.Е. Корнет // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. – 2013. – № 10. – С. 24-28.
6. Тимофеева А.С. Определение факторов, влияющих на сход шихты в печи металлургического процесса НУЛ – III, методом статистической обработки данных / А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко // Черная металлургия. – 2012. – № 3. – С. 37-39.

References:

1. Knotec M. *Analiz metallurgicheskikh protsessov metodami matematicheskoi statistiki* [Analysis of metallurgical processes the methods of mathematical statistics]. Moscow, Metallurgija Publ., 1968. 212 p. (Rus.)
2. Gasik M.M. *Matematicheskii analiz eksperimental'nykh dannykh elektroprovodnosti shlakovykh rasplavov sistemy MnO - SiO₂ - CaO proizvodstva margantsevykh ferrosplavov* [Mathematical analysis of experimental data of conductivity of slag fusions of the system MnO - SiO₂ - CaO of production of manganese ferro-alloys]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost' - Metallurgical and Mining Industry*, 2011, no. 2, pp. 32-37. (Rus.)
3. Gushchina M.S., Poletskov P.P., Salganik V.M., Chikishev D.N. *Novyi podkhod k integral'noi otsenke obshchego urovnia ispolneniia tekhnologii i dostizheniia kachestva produktsii na osnove statisticheskikh metodov* [New going near the integral estimation of general level of execution of technology and achievement of quality of products on the basis of statistical methods]. *Metallurg - Metallurgist*, 2014, no. 4, pp. 103-106. (Rus.)

4. Pervov L.F., Shkurkin V.I., Ageev Iu.A., Buldygin S.V. Statisticheskoe upravlenie protsessami proizvodstva ferrosplavov i modifikatorov chuguna [Statistical management by the processes of production of ferro-alloys and modifiers of cast-iron]. *Lit'e i metallurgiiia – Foundry and metallurgy*, 2012, no. 3(67), pp. 120-125. (Rus.)
5. Korneeva A.A., Kornet M.E. Neparametricheskoe modelirovanie konverternoi plavki [Non-parametric design of the converter melting]. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaia Metallurgiiia – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2013, no. 10, pp. 24-28. (Rus.)
6. Timofeeva A.S. Opredelenie faktorov, vliiaushchikh na skhod shikhty v pechi metallizatsii protsessu HYL – III, metodom statisticheskoi obrabotki dannykh [Determination of factors influencing on the tails of charge in the stove of metallization of process of HYL - III, by the method of the statistical processing of data]. *Chernaia Metallurgiiia – Ferrous Metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 37-39. (Rus.)

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

Статья поступила 24.10.2016