

Исследование зависимости образования выбросов вредных веществ от технологических параметров

Приведены результаты исследования образования выбросов загрязняющих веществ от литейных плавильных печей на базе промышленных данных. Определена зависимость между образованием выбросов вредных веществ и технологическими параметрами плавки, построены графики зависимости функций отклика от каждого из независимых параметров.

Ключевые слова: выбросы вредных веществ, технологические параметры, процесс плавки, функции отклика, уравнение регрессии, коэффициент корреляции.

Современные производства металлургического комплекса не являются экологически чистыми и в значительной степени загрязняют окружающую среду. Поэтому основными задачами в области экологии является создание на металлургических предприятиях безвредных, безопасных и благоприятных условий труда. Решение этих проблем требует принципиально новых научных разработок, которые бы способствовали обеспечению уменьшения выбросов вредных веществ на этапе проектирования или реконструкции производства.

Поэтому целью данной работы было установление зависимости выбросов вредных веществ в процессе плавки от исходных технологических параметров.

В связи с актуальностью вопроса в работе проведены исследования образования выбросов загрязняющих веществ от плавильных печей с целью определения возможности математического моделирования процесса. Одновременно изучены производственные условия образования выбросов загрязняющих веществ, проведено ознакомление с качественным и количественным составом выбросов, санитарно-гигиеническими и другими характеристиками, которые уже есть на производстве.

Исходя из анализа состояния охраны труда и окружающей среды в литейном производстве, в расчетные данные для прогнозирования экологического состояния включены следующие вредные вещества: X – пыль неорганическая с содержанием SiO_2 20-70%; N – диоксид азота (NO_2); S – серы диоксид (SO_2); C – оксид углерода (CO) [1].

При этом важными технологическими факторами, влияющими на показатели процесса определены: содержание химических элементов углерода, кремния, серы, фосфора, марганца в сплаве в относительных единицах: объем плавки (Q), кг; температура плавления металла (T), °C; доля металлического лома в шихте (q/Q); доля возвратных отходов в шихте (m/Q).

Результатом проведенной работы стала разработка математической модели процесса, анализ полученных данных и проверка полученных регрессионных моделей построением графиков.

Изучали влияние технологических параметров плавки чугуна на количество выбросов вредных веществ [2].

Планирование эксперимента сводилось к построению матрицы, что определяет изменение исследуемых факторов при каждом опыте [3]. Замеры выбросов загрязняющих веществ проводили в период расплавления шихты и выдержки жидкого металла. Для проведения намеченных исследований использовано планирование типа 2^{8-4} , для реализации которого провели 2 серии опытов по 16 экспериментальных плавов и было изучено влияние содержания химических элементов в сплаве, объема плавки, частицы металлического лома и возвратных отходов в шихте на количество выбросов, при этом независимых факторов было 8, функций отклика – 4 [4].

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1.

Ошибки эксперимента определялись по результатам четырех плавов на основном уровне, то есть при средних значениях независимых переменных.

Обработка результатов эксперимента проведена с помощью регрессионного анализа, при этом содержание химических элементов в чугуне корректировалось за фактическим значением в каждой плавке. Точность уравнений регрессии проверена на серии контрольных плавов. Средние отклонения между расчетными и фактическими данными находятся в пределах ошибки эксперимента.

Установлена количественная связь между образованием выбросов вредных веществ и технологическими параметрами плавки.

Минимальные и максимальные величины изучаемых факторов и контролируемых показателей приведены в табл. 2.

За основу взяты модели типа «полный квадрат», то есть такие, что включают в качестве регрессоров линейные члены, квадраты и взаимодействия. Некоторые взаимодействия были сразу исключены, поскольку являлись линейными комбинациями других факторов.

Проведена пошаговая селекция регрессоров исключением их из полной модели.

Матрица планирования эксперимента для изучения влияния параметров процесса плавки чугуна на количество выбросов вредных веществ

Уровни варьирования изучаемых факторов		Изучаемые факторы								
		C, %	Si, %	S, %	P, %	Mn, %	Q, кг	q/Q	m/Q	
Основной уровень (0)		3,25	1,95	0,08	0,15	0,75	500	q/Q	m/Q	
Интервал варьирования		0,25	0,25	0,02	0,07	0,25	50	0,5	0,2	
Верхний уровень (+1)		3,5	2,2	0,1	0,22	1,0	550	0,2	0,1	
Нижний уровень (-1)		3,0	1,7	0,06	0,08	0,5	450	0,7	0,3	
Кодовое обозначение переменных		x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
Номер плавков по плану типа 2 ³⁻⁴	1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
	3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
	4	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1
	5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1
	6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
	7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
	8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
	9	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
	10	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
	11	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
	12	+1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
	13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
	14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
	15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
	16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Номер плавков на основном уровне	17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
	19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

Результаты замеров выбросов

	Изучаемые факторы								Контролируемые показатели, кг/т			
	C, %	Si, %	S, %	P, %	Mn, %	Q, кг	q/Q	m/Q	SiO ₂	NO ₂	SO ₂	CO
min	3,4	2,0	0,022	0,079	0,54	2500	0,5	0,3	65,74	8,25	10,23	205,9
max	3,65	2,28	0,025	0,082	0,65	2850	0,6	0,3	92,43	10,25	15,26	226,0

Получены следующие уравнения регрессии:

$$R^2 = 66,2816$$

$$\begin{aligned} \text{SiO}_2 = & -157,922 + 3054,44 \cdot P + \\ & + 83,0813 \cdot \text{Mn}^2 - 818,036 \cdot C \cdot P + \\ & + 0,030421 \cdot C \cdot Q - 0,0092321 \cdot \text{Si} \cdot Q - \\ & - 0,0268412 \cdot \text{Mn} \cdot Q \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 = & 44,8578 + 543,956 \cdot \text{Si} - 839,16 \cdot S - \\ & - 1958,83 \cdot \text{Mn} + 34,927 \cdot S^2 - \\ & - 152,761 \cdot C \cdot \text{Si} + 544,432 \cdot C \cdot \text{Mn} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R^2 = 37,4614$$

$$R^2 = 92,8607$$

$$\begin{aligned} \text{NO}_2 = & 906,062 - 793,505 \cdot \text{Si} - 228,164 \cdot \text{Mn} + \\ & + 56,5909 \cdot \text{Si}^2 + 0,00183783 \cdot S^2 - \\ & - 161864,0 \cdot P^2 + 1875,61 \cdot C \cdot P - \\ & - 0,056838 \cdot C \cdot Q + 6854,86 \cdot \text{Si} \cdot P + \\ & + 1,88788 \cdot P \cdot Q + 0,0899621 \cdot \text{Mn} \cdot Q \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{CO} = & -2671,94 + 64419,4 \cdot P + 0,0539086 \cdot Q + \\ & + 95,2158 \cdot \text{Si}^2 - 9990,31 \cdot C \cdot P + \\ & + 1416,38 \cdot C \cdot \text{Mn} - 710,347 \cdot \text{Si} \cdot \text{Mn} - \\ & - 44116,1 \cdot P \cdot \text{Mn} \end{aligned} \quad (4)$$

$$R^2 = 42,2346$$

При этом уравнения регрессии 3, 4 (для SO₂ и CO) имеют низкое значение коэффициента R²<0,5, так что это описание нельзя считать удачным.

Уравнения регрессии 1, 2 (для SiO_2 и NO_2) имеют общую черту – фактор Q входит в них в основном не самостоятельно, а в составе взаимодействий. То есть можно считать, что его величина усиливает действие других факторов (элементов химического состава).

Для наглядной демонстрации влияния отдельных факторов в многофакторных моделях построены графики зависимости функций отклика от каждого из независимых параметров в пределах их области определения. Последние параметры при этом фиксировали в некоторых заранее заданных значениях (минимальном, максимальном или среднем), также в пределах области определения.

На каждом графике приведены три кривые (min, middle, max), для которых значения фиксированных параметров минимальные, средние и максимальные соответственно.

В уравнении 1 модель дает хорошее описание, коэффициент корреляции больше 0,9, графики хорошо ложатся в область значений. Зависимость выбросов SiO_2 от C , P и Q – линейная, монотонное возрастание. Зависимость от Si – линейная, монотонное убывание. Зависимость от Mn – квадратичная, монотонное возрастание.

В уравнении 2 модель дает неплохое описание, графики ложатся в область значений. Зависимость выбросов NO_2 от C – линейная. Характер ее зависит от величины Q : при минимальном Q имеет место возрастание, при среднем и максимальном – убывание. То есть выраженная зависимость от влияния факторов C и Q . (рис. 1).

Зависимость от Si – квадратичная, в районе точки 2,16 имеется минимум (рис. 2).

Зависимость от S – квадратичная, монотонное возрастание. Значение коэффициента при S_2 довольно небольшое и на графике видно, насколько мало меняется значение NO_2 при росте S (рис. 3).

Зависимость от P – квадратичная. Характер ее неоднозначен – для кривой min имеет место монотонное убывание, для кривой max – возрастание, для кривой middle – максимум в районе 0,083. То есть зависимость от P проявляется как зависимость от взаимодействия P с другими факторами (рис. 4).

Зависимость от Mn – линейная, характер ее зависит от влияния Q – для минимального значения Q имеет место монотонное убывание, для среднего и максимального – монотонное возрастание (рис. 5).

Зависимость от Q – линейная, монотонное возрастание. При этом тангенс угла наклона прямой неодинаков и зависит от взаимодействия с другими факторами (рис. 6).

В уравнении 3 модель дает не очень хорошее описание, коэффициент корреляции ниже 0,5, хотя графики хорошо ложатся в область значений.

Зависимость от C – линейная. Характер ее зависит от взаимодействия с другими факторами. Кривая min показывает падение, кривая max – возрастание, кривая middle – почти постоянное значение.

Зависимость от Si – линейная. Характер ее неоднозначен и обусловлен взаимодействием с другими

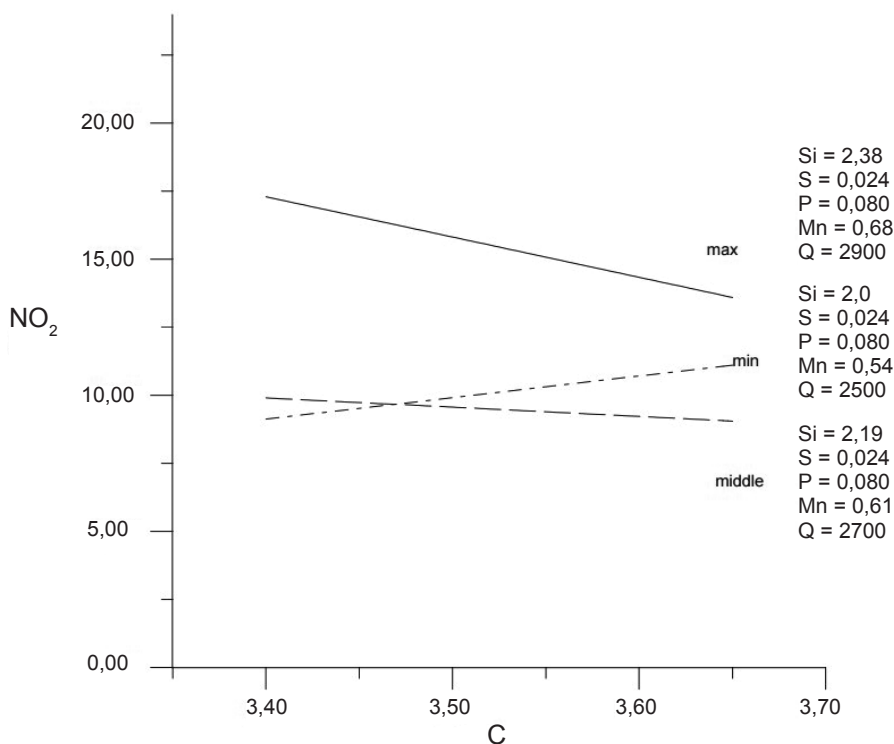


Рис. 1. Зависимость выбросов NO_2 от содержания углерода

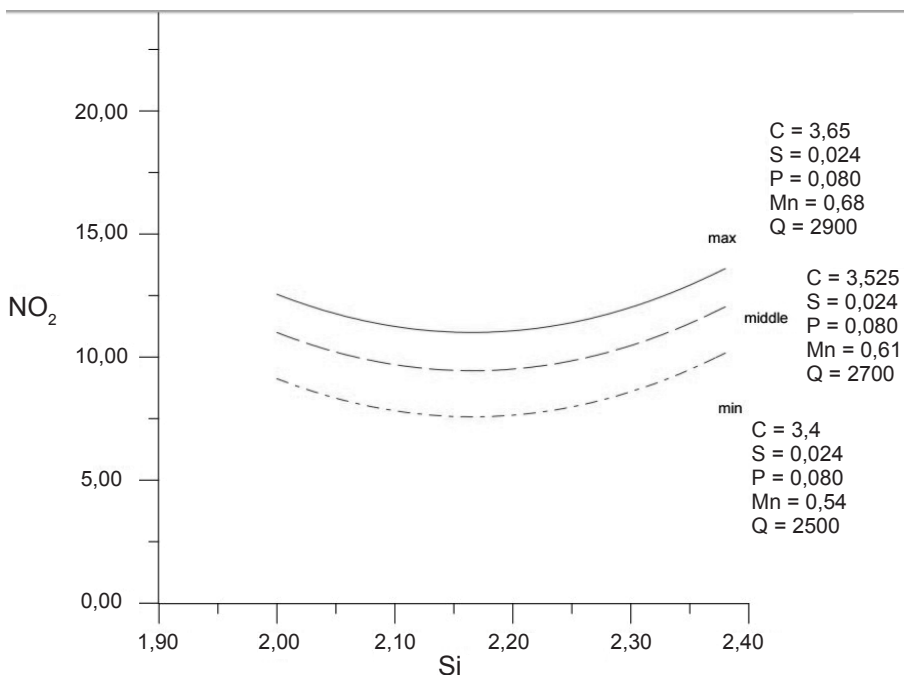


Рис. 2. Зависимость выбросов NO_2 от содержания кремния

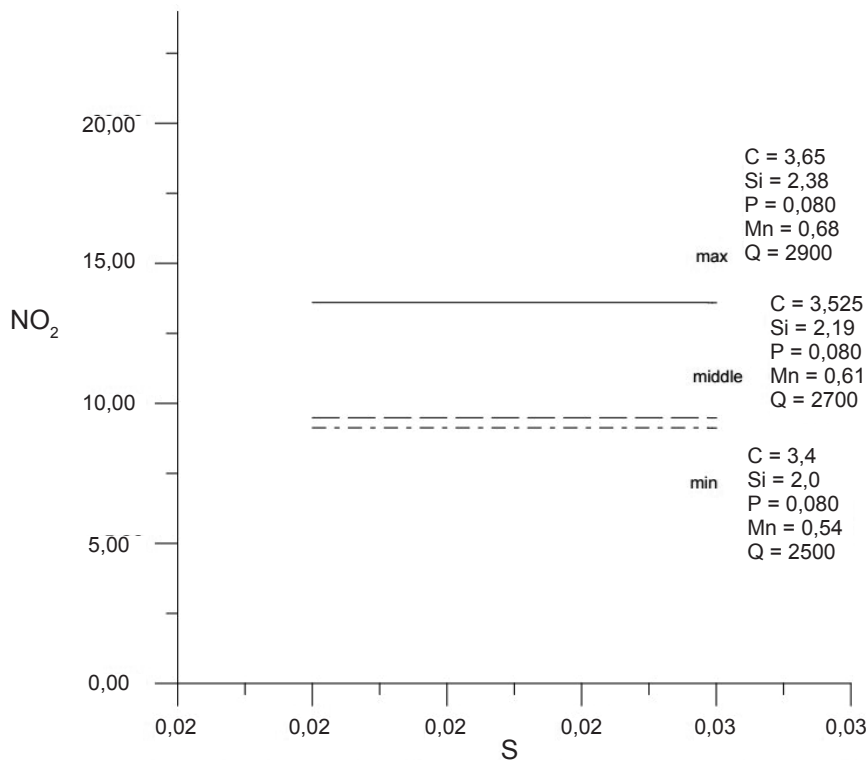


Рис. 3. Зависимость выбросов NO_2 от содержания серы

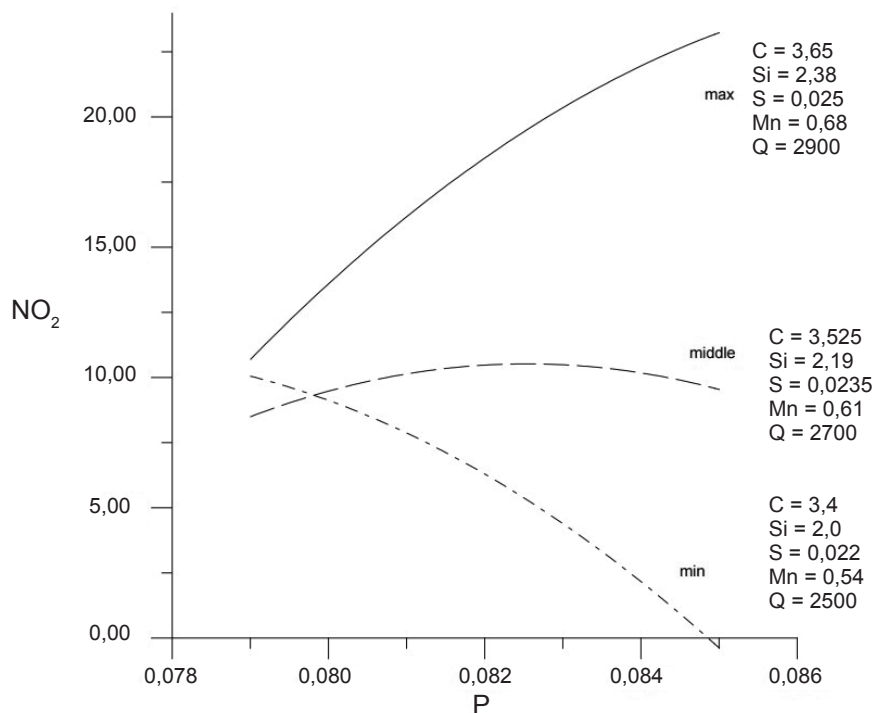


Рис. 4. Зависимость выбросов NO_2 от содержания фосфора

факторами – для кривых min и middle – возрастания, для кривой max – уменьшение, причем угол наклона в кривых min и middle – разный.

Зависимость от S – квадратичная, монотонное убывание.

Зависимость от Mn – линейная, характер ее неоднозначен и обусловлен взаимодействием с другими факторами – для кривых min и middle – возрастание, для кривой max – уменьшение, причем угол наклона в кривых min и middle разный.

В уравнении 4 модель дает не очень хорошее описание, коэффициент корреляции ниже 0,5, хотя графики хорошо ложатся в область значений.

Зависимость от C – линейная. Характер ее зависит от взаимодействия с другими факторами. Кривая min показывает падение, кривые middle и max – возрастание.

Зависимость от Si – квадратичная. Характер ее неоднозначен и обусловлен взаимодействием с другими факторами – для кривой min – возрастание, для кривой max – убывание, у кривой middle есть минимум в районе значения 2,28.

Зависимость от P – линейная, характер ее неоднозначен и обусловлен взаимодействием с другими факторами – для кривых min и middle – возрастание, для кривой max – уменьшение, причем угол наклона в кривых min и middle – разный.

Зависимость от Mn – линейная, монотонное убывание для всех кривых, хотя и с разными тангенсами углов наклона (что свидетельствует о влиянии взаимодействия с другими факторами).

Зависимость от Q – линейная, возрастание.

В результате проведенных научных исследований установлено следующее:

- определена зависимость между образованием выбросов вредных веществ от плавильных печей и технологическими параметрами плавки, при этом содержание фосфора, серы, доля металлического лома в шихте q/Q и доля возвратных отходов в шихте m/Q незначительно влияют на количество выбросов в связи с малым интервалом варьирования;

- разработана математическая модель процесса образования выбросов;

- построены графики зависимости функций отклика от каждого из

независимых параметров.

Разработанную математическую модель, связывающую количество выбросов вредных веществ в атмосферу от плавильных литейных печей с параметрами процесса плавки, возможно применять при расчете вентиляции, реконструкции производства и расчете и согласовании предельно допустимых показателей выбросов.

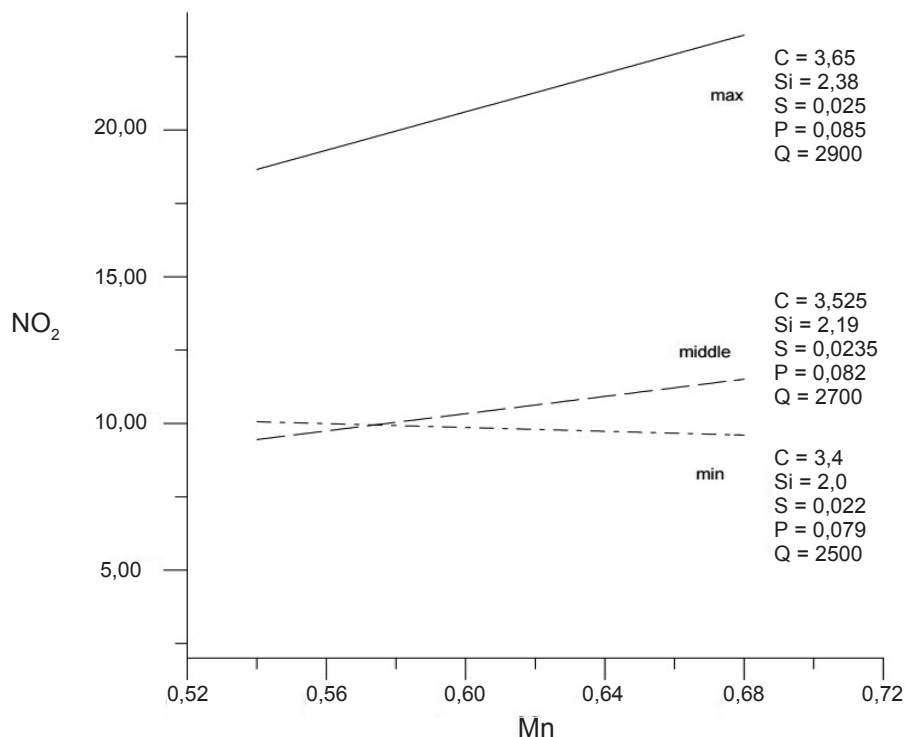


Рис. 5. Зависимость выбросов NO_2 от содержания марганца

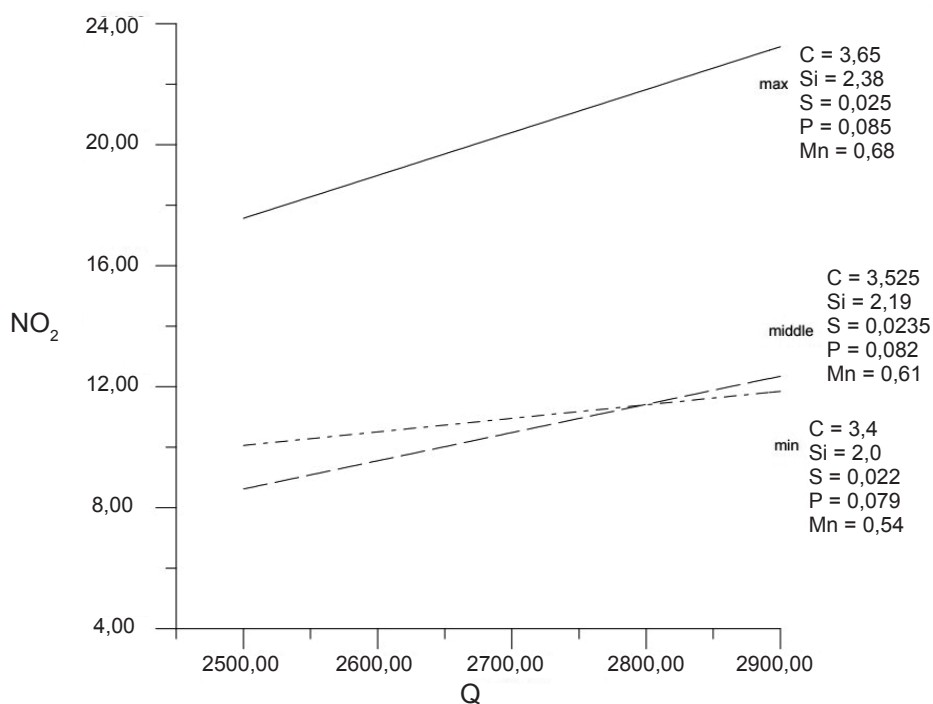
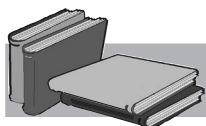
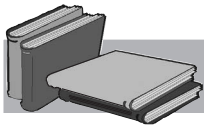


Рис. 6. Зависимость выбросов NO_2 от объема плавки



ЛИТЕРАТУРА

1. Шалевская И. А., Гутько Ю. И. Расчет выбросов загрязняющих веществ в литейном производстве // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 5. – С. 22-24.
2. Технические и экономические основы литейного производства // Под ред. В. М. Шестопала. – Москва. – «Машиностроение». – 1974. – С. 48-64.
3. Черный А. А. Математическое моделирование в литейном производстве // Учеб. Пособие. – Пенза. – 2006. – С. 73-74.
4. Шалевская И. А., Гутько Ю. И., Тарасевич Н. И., Токарева О. А. Прогнозирование образования выбросов вредных веществ из литейных плавильных печей // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 9. – С. 22-27.



REFERENCES

1. Shalevskaja I. A., Gut'ko Yu. I. (2011). Raschet vybrosov zagriazniaiushchikh veshchestv v liteinom proizvodstve. [The calculation of pollutant emissions in foundry]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 5, pp. 22-24. [in Russian].
2. Shestopal V. M. (1974). Tekhnicheskie i ekonomicheskie osnovy liteinogo proizvodstva. [Technical and economic fundamentals of foundry]. Moscow: Mashinostroenie, pp. 48-64. [in Russian].
3. Chernyi A. A. (2006). Matematicheskoe modelirovanie v liteinom proizvodstve. [Mathematical modeling in foundry]. Ucheb. Posobie, Penza, pp. 73-74. [in Russian].
4. Shalevskaja I. A., Gut'ko Yu. I., Tarasevich N. I., Tokareva O. A. (2014). Prognozirovaniie obrazovaniia vybrosov vrednykh veshchestv iz liteinykh plavilnykh pechei. [Prediction of formation of harmful emissions from foundry melting furnaces]. Metall i lit'e Ukrainy, no. 9, pp. 22-27. [in Russian].

Анотація

Шалевська І. А.

Дослідження залежності утворення викидів шкідливих речовин від технологічних параметрів

Наведено результати дослідження утворення викидів забруднюючих речовин від ливарних плавильних печей на базі промислових даних. Визначено залежність між утворенням викидів шкідливих речовин та технологічними параметрами плавки, побудовано графіки залежності функцій відгуку від кожного з незалежних параметрів.

Ключові слова

Викиди шкідливих речовин, технологічні параметри, процес плавки, функції відгуку, рівняння регресії, коефіцієнт кореляції.

Summary

Shalevskaja I.

Research of dependence of formation of harmful substances emissions on technological parameters

Results of a research of formation of polluting air emissions from melting furnaces on the basis of industrial data are shown. Dependence between formation of polluting air emissions of harmful substances and technological parameters of melting is determined and diagrams of response functions dependence on each of independent parameters are built.

Keywords

Emissions of harmful substances, technological parameters, smelting process, response functions, regression equation, correlation coefficient.

Поступила 25.11.16