

Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю., Гридин Н.А., Шалайкин С.Р.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДОВ ПОПУТНЫХ ПРОДУКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ АНАЛИЗЕ СООТНОШЕНИЯ МАРОК И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕЙ

Аннотация. В работе представлены результаты математического моделирования, позволяющие синхронно прогнозировать попутные продукты коксохимического производства (КХП) по четырем предикторам: смоле, бензолу, сульфату аммония, коксовому газу, при одновременном анализе соотношения десяти марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС и девяти показателей качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита. Впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок и показателями качества углей и предикторами. Впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов, а также зависимость между функцией ковариация (f) и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву исследованных предикторов. Впервые установлены зависимости между f и фактическими суммарными значениями предикторов. Установлено изменение характера зависимости между f и смолой при изменении сортировки массива f на предиктор и появлении точки экстремума, что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов. Полученные технологические зависимости и математические закономерности свидетельствуют о сложности физико-химических процессов КХП, что определяет обязательное требование к системному развитию математического аппарата и детализации математического моделирования по каждой марке угля. При статистической обработке данных и математическом моделировании использовались методики и алгоритмы математического анализа, математического аппарата, разработанные авторами настоящего исследования, адаптированные к условиям нестабильной работы предприятия с полным металлургическим циклом, функционирующего в прифронтовой полосе ведения боевых действий.

Ключевые слова: попутные продукты коксохимического производства, соотношения марок углей, показатели качества углей, смола, бензол, сульфат аммония, коксовый газ

В настоящее время ряд коксохимических предприятий сталкивается с проблемой неоднородного выхода классов кокса из коксовых батарей, в связи с чем М.Н. Степановой предложена математическая модель процесса коксохимического производства (КХП) с целью оптимизации фракционного состава кокса, предназначенная для анализа данных и построения предсказательных моделей. Представлен результат работы в табличном процессоре Excel, с помощью которого можно произвести транспонирование и выборку данных из исходного материала. Проведен факторный анализ в программе STATISTICA, который позволил выявить все факторы, влияющие на выход валового кокса размером более 80 мм. С помощью математической модели скорректировано процентное соотношение шихт для получения однородного размера валового кокса [1].

В работе представлены математические расчеты по снижению себестоимости чугуна за счет уменьшения расхода кокса в доменном цехе на основе оптимизации закупки угольной шихты. Задача оптимизации закупки угольной шихты направлена на подбор долевого участия поставщиков, обеспечивающего минимальную стоимость угольной шихты при технологически заданном качестве кокса. Результаты проведенного исследования А. В. Липатниковым с сотрудниками позволили решить ряд научных задач. В частности, разработать методики оптимального потребления угольной шихты, определить нелинейные статистические взаимосвязи между показателями качества

угольной шихты и показателями качества получаемого кокса, показателями качества кокса и удельным расходом кокса на уровне 70-80%, определить принципиальные возможности построения модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья на основе имеющихся статистических данных, возможность снижения стоимости используемой угольной шихты при аналогичном качестве, либо улучшения качества кокса при неизменной цене на основе использования разработанной модели. Дальнейшее развитие модели авторы акцентировали на разработку автоматизированной системы планирования привоза и потребления угольной шихты, а также для прогнозирования качества кокса при фактическом привозе [2].

В работе выполнено математическое моделирование прохождения двухфазного пылегазового потока через пылесадительные бункеры установок различных конфигураций для сухого тушения кокса. Определено влияние особенностей конструкции пылесадительного бункера на эффективность пофракционно-го улавливания коксовой пыли и скорость пылегазового потока, проходящего через бункер. Получены данные, позволяющие выявить закономерности осаждения коксовой пыли, повысить эффективность конструкции пылесадительного бункера, снизить его материалоемкость и уменьшить эрозионный износ оборудования, установленного за бункером по ходу пылегазового потока [3].

В работе разработана трехмерная модель обогревательного простенка коксовой батареи в CFD-программе Fluent. Результаты расчетов на модели показали удовлетворительную сходимость с экспери-

ментальными данными. Математическая модель позволяет решать задачи повышения равномерности нагрева по высоте, ширине и длине коксового пирога путем регулирования режима процесса горения, задачи изменения конструктивных характеристик обогревательного простенка коксовой печи, повышения прочности кокса, экономии топливно-энергетических ресурсов и снижения вредных выбросов [4].

На основе полного факторного эксперимента в работе изучено влияние расхода реагентов, плотности пульпы, процента содержания тонких шламов в угольной пульпе и времени флотации на качественно-количественные показатели флотации угольной мелочи. С использованием метода математического моделирования получены регрессионные зависимости первого порядка, в которых в качестве функции отклика выбраны суммарный выход концентрата, зольность концентрата, извлечение горючей массы в концентрат и селективность процесса, включающие в себя совокупность качественно-количественных показателей процесса флотации угольной мелочи. По мнению В. Н. Петухова с коллегами, использование выявленных зависимостей позволяет не только прогнозировать результаты процесса флотационного обогащения угля, содержащего большое количество тонкодисперсных угольных шламов, но и управлять флотационным процессом [5].

В работе представлена разработка метода прогноза выхода химических продуктов коксования из углей и их смесей на основе характеристик их качества с использованием метода нейросетевого математического моделирования. Приведены результаты кластерного анализа данных показателей качества углей и выхода из них химических продуктов коксования на примере кокса, каменноугольной смолы, сырого бензола и коксового газа. Данный метод исследований является частью математического анализа данных и необходим для последующего математического моделирования. На основании анализа иерархического дерева исследованных угольных концентратов Е. В. Васильевой с коллегами сделан вывод об их распределении по классам в соответствии с марочной принадлежностью и свойствами, отражаемыми результатами технического, петрографического, элементного анализа и оценки структурных показателей. Показано, что элементы выборки образуют четыре естественных кластера. На основе полученных результатов разработаны модели, позволяющие прогнозировать выход химических продуктов коксования по характеристикам качества исходных углей [6].

В работе с помощью математического моделирования проведен расчет концентрационного, температурного и скоростного полей газовых потоков при сгорании отопительного газа в отопительном канале коксовой печи. В частности, изучено влияние коэффициента избытка воздуха и характера газодинамики в обогревательном простенке коксовой печи на концентрацию продуктов сгорания [7].

В работе представлена разработка и внедрение системы математического моделирования производ-

ства всего металлургического комбината на примере АО «ЕВРАЗ ЗСМК». В отличие от существующих систем моделирования переделов, целью системы является единовременная сквозная оптимизация всех переделов комбината. Авторами разработана и проанализирована форма статистики, которая выявила следующие основные проблемы: 1) неразрешимость модели из-за ввода математически некорректных данных; 2) повторные расчеты экономических кейсов для выделения и интерпретации отдельных изменившихся факторов плана от бюджета; 3) ошибки на этапе верификации данных из-за некорректного химического состава элементов или неверных настроек модели под конкретный период работы. Для устранения недостатков системы А.С. Леонтьевым и И.А. Рыбенко разработаны системы валидации вводимых данных на этапе до и после расчетов, модули анализа чувствительности и факторный расчет, система автоматического заполнения химического состава, а также добавлена возможность переобучения модели на исторических данных [8].

Результаты математического моделирования, в том числе нейросетевого, технологических аспектов коксохимического производства и прогнозирования выхода химических продуктов коксования также предметно рассмотрены в работах. Наибольший научный интерес представляют математические исследования Е.В. Васильевой по прогнозированию выхода химических продуктов коксования при помощи нейросетевого математического моделирования. Среди ряда научных работ по математическому моделированию следует сделать особый акцент на работы по изучению процессов теплопереноса и термической деструкции угольной шихты в коксовых печах, углубленного анализа факторов, влияющих на процесс тушения кокса в камере установки сухого тушения кокса, и определению равномерности горячей прочности и реакционной способности кокса [9-12].

Таким образом, в литературных источниках отсутствуют результаты математического моделирования по прогнозированию получения попутных продуктов КХП, при комплексном анализе соотношения 10 марок углей и 9 показателей качества углей для четырех предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония, коксового газа.

Целью работы является математическое моделирование прогнозирования получения попутных продуктов КХП, при одновременном анализе соотношения 10 марок углей и 9 показателей качества углей.

Объектом исследования являются попутные продукты КХП (смола, бензол, сульфат аммония, коксовый газ), марки углей (Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС), показатели качества углей (содержание влаги, золы, серы, индекс основности золы и угля, выход летучих на сухую и горячую массу, ширина пластического слоя, средний показатель отражения витринита).

Предметом исследования является математическое моделирование прогнозирования получения попутных продуктов КХП.

Задачи исследования:

1. Разработать аддитивную математическую модель для прогнозирования попутных продуктов КХП в зависимости от соотношения марок углей и показателей качества углей по фактическим и синтетическим коэффициентам множественной регрессии.
2. Построить функции нормального распределения Гаусса – Лапласа.
3. Получить коэффициенты корреляции Пирсона, ковариации, множественной регрессии по фактическим и нормализованным зависимым факторам.
4. Определить критерии Фишера – Снедекора.
5. Апробировать метод наименьших квадратов.
6. Определить степень относительного влияния зависимых факторов на предикторы по общему массиву и подмассивам.
7. Определить относительную ошибку прогноза.
8. Построить зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву.
9. Построить зависимость между функцией ковариации и фактическими суточными значениями предикторов
10. Осуществить проверку адекватности модели.

Методика исследований

Исследованные предикторы (YFn): Y-Factor 1 (YF1) – смола, Y-Factor 2 (YF2) – бензол, Y-Factor 3 (YF3) – сульфат аммония, Y-Factor 4 (YF4) – коксовый газ. В статистическом анализе использовали массив данных соотношения углей по 10 маркам (табл. 1) и по 33 поставщикам за 305 суток (табл. 2) периода январь-октябрь 2024 г. коксохимического производства ООО «Южный горно-металлургический комплекс».

Таблица 1

Исследованные марки углей

X-Factor (XF)	Наименование марки угля
XF1	Г
XF2	ГЖО
XF3	ГЖ
XF4	Ж
XF5	КЖ
XF6	К
XF7	КО
XF8	КСН
XF9	КС
XF10	ОС

Таблица 2

Показатели качества исследованных марок углей по поставщикам

№ п/п	Поставщик	Марка	Показатели качества								
			W	A	S	Vd	Vdaf	Y	Ro	Io	Ио
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	РФ Сила Сибири	Г	8,1	7,4	0,41	40,4	43,6	10,00	0,60	0,40	5,22
2	СМС, Карбон Уголь	ГЖО	9,6	7,6	0,51	35,8	38,7	10,30	0,70	0,19	2,36
3	РФ, Воркутауголь	ГЖО	6,9	9,0	1,28	33,2	36,5	10,00	0,74	0,19	2,73
4	Ресурс Углесбыт СМС, РФ	ГЖО	7,3	7,9	0,51	35,3	38,4	11,50	0,72	0,13	1,62
5	РФ Карбон Промресурс	ГЖ	8,9	6,7	0,50	37,1	39,8	18,83	0,81	0,21	2,35
6	Сибуглемет СМС, РФ	ГЖ	9,0	8,6	0,42	34,8	38,1	20,40	0,82	0,18	2,54
7	СМС, Синдикат Промо	ГЖ	9,5	8,7	0,50	36,2	39,6	20,00	0,75	0,21	3,03
8	ИСТЭК, обогащение рядовки ГЖ	ГЖ	11,0	10,3	0,42	36,0	40,0	18,00	0,70	0,56	9,64
9	Воркута уголь СМС, РФ	Ж	7,5	8,8	1,10	32,7	35,8	17,22	0,82	0,21	2,89
10	РФ СИБУГЛЕМЕТ	Ж	9,0	8,6	0,42	34,8	38,1	20,40	0,82	0,18	2,54
11	Синдикат Промо СМС, РФ	Ж	9,8	10,5	0,51	20,5	22,8	15,50	1,18	0,22	2,95
12	РФ ТопПром	Ж	9,8	9,3	0,56	31,8	35,1	31,83	0,96	0,23	3,35
13	СМС, Континент-Н, ММК Уголь	Ж	8,1	8,5	0,58	29,5	32,3	34,00	1,01	0,32	4,08
14	Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
15	Специалист Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
16	ДОН ТРЕЙД Самсоновская	Ж	8,4	8,3	1,75	31,2	34,0	20,00	0,85	0,42	4,27
17	СМС, АДВ Инвест, РФ	Ж	9,0	9,7	0,54	31,8	35,2	32,25	0,94	0,23	3,39
18	ДОН ТРЕЙД Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
19	Специалист Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
20	Углеком	Ж	9,1	5,7	2,42	29,3	31,0	34,00	1,03	0,51	4,08
21	ПТК СМС ,РФ	Ж	8,2	8,9	0,73	35,8	39,3	30,17	0,85	0,25	3,65
22	РФ Сила Сибири	Ж	7,3	7,5	0,72	35,6	38,5	28,00	0,81	0,25	3,11
23	РФ Перспектива	КЖ+Ж	10,1	7,7	0,38	28,9	31,3	20,40	0,93	0,21	2,33
24	РФ Воркутауголь	К	7,3	8,9	0,77	22,3	24,4	21,07	1,24	0,23	2,74
25	СМС, Синдикат Промо	К	9,8	10,5	0,51	20,5	22,8	15,50	1,18	0,22	2,95
26	СМС, Северный Кузбасс	К	9,5	9,9	0,57	19,8	21,9	17,50	1,18	0,20	2,49
27	СМС, Краснокам., Персп., Карб. тр.	К	8,8	8,4	0,43	24,4	26,6	15,50	1,07	0,18	2,09
28	СМС, Карбо Сибирь	К	9,0	9,6	0,75	22,1	24,4	18,00	1,19	0,23	2,88
29	СМС, Карбон Уголь	КО	9,9	8,1	0,34	25,6	27,8	10,00	0,96	0,34	3,84
30	РФ МЕЛТЭК	КСН	8,1	8,6	0,30	27,0	29,5	9,25	0,83	0,14	1,73
31	СМС, Сибуглемет У-7	КС	7,0	9,1	0,31	17,3	18,9	8,00	1,44	0,20	2,28
32	СМС, Сибуглемет Уголь	ОС	7,8	8,7	0,28	19,1	21,0	10,33	1,36	0,41	4,56
33	СМС, АЛС Трейд, АЛЕНСИ	ОС	8,6	8,5	0,47	17,4	19,0	11,50	1,31	0,13	1,37

В табл. 3 представлены обозначения и наименования исследованных 9 показателей качества углей (ПКУ).

Таблица 3

Обозначения и наименования исследованных показателей качества углей

№ п/п	Обозначение	Наименование показателей качества углей	Ед. изм.
1	W	Содержание влаги	%
2	A	Содержание золы	%
3	S	Содержание серы	%
4	Vd	Выход летучих на сухую массу	%
5	Vdaf	Выход летучих на горючую массу	%
6	Y	Ширина пластического слоя	мм
7	Ro	Средний показатель отражения витринита	ед.
8	Io	Индекс основности золы	ед.
9	Io	Индекс основности угля	ед.

При статистической обработке данных, математическом анализе и математическом моделировании использовались методики, представленные в работах [13-16], а также алгоритмы математического анализа и математического аппарата, разработанные авторами настоящего исследования, адаптированные к условиям нестабильной работы предприятия с полным металлургическим циклом, функционирующего в прифронтовой полосе ведения боевых действий [17-22].

В частности, для получения корреляционных связей использовали коэффициент корреляции Пирсона – Pearson correlation coefficient (R), рассчитываемый по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции Пирсона; n – объём выборки; x_i – i -й фактор выборки X; y_i – i -й фактор выборки Y; \bar{x} – среднее значение выборки X; \bar{y} – среднее значение выборки Y.

Коэффициенты множественной регрессии – Multiple regression coefficient (K) получены при помощи метода наименьших квадратов. Метод заключается в определении аппроксимирующей функции, сумма квадратов отклонений F от которой до экспериментальных (табличных) значений будет наименьшей ($F \rightarrow \min$):

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2, \quad (2)$$

где F – аппроксимирующая функция; n – объём выборки; x_i – i -й фактор выборки X; y_i – i -й фактор выборки Y.

Нормализованные коэффициенты – The coefficient of multiple regression is normalized (K_N) получены после нормализации исследованного массива по формуле

$$Z_{xi} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (3)$$

где Z_{xi} – Z Стандартизация фактических XFn; x_i – i -й фактор выборки X; \bar{x} – среднее значение выборки X; σ – среднее квадратичное отклонение.

Проверку значимости модели при выполнении нулевой гипотезы анализировали по F-распределению критерия Фишера – Снедекора (F-test):

$$F = F_{\text{факт}} = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \cdot \frac{m}{n - m - 1}, \quad (4)$$

где m – количество XFn; n – объём выборки; y_i – i -й фактор выборки Y; \bar{y} – среднее значение выборки Y.

Адекватность модели определяли по отношению между расчетным (F_p) и табличным (F_T) значениям критерия Фишера:

$$F_p / F_T > 1. \quad (5)$$

При отношении $F_p / F_T > 1$, аддитивная модель считалась актуализированной. Использовали стандартную дополнительную ошибку для расчета критерия Фишера – 5%.

Коэффициент вариации – Coefficient of variation (CV) определяли как отношение между среднеквадратичным отклонением σ и среднестатистическим значением μ по выборке:

$$CV = \sigma / \mu. \quad (6)$$

Абсолютную ошибку – Absolute error (AE) определяли по модулю разницы между фактическим и расчетным значением аргумента. Относительную ошибку – Relative error (RE) определяли в процентах как отношение между абсолютной ошибкой и фактическим значением независимой переменной.

Относительную степень влияния – Relative degree of influence (RDI) X-Factors на Y-Factor определяли в процентах от максимального значения нормализованных коэффициентов по модулю.

Распределение значений XFn&YF строили по функции распределения Гаусса – Лапласа.

Математическую функцию ковариация f использовали для расчета коэффициента ковариации всей совокупности двух диапазонов данных (генеральной совокупности) и возвращения соответствующего значения. Функцию f определяли по формуле

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n}, \quad (7)$$

где \bar{x} , \bar{y} – средние значения выборки; n – размер выборки.

Функция f установлена между массивами 1 и 2. Массив 1 состоит из среднестатистических произведений между соотношением углей (см. табл. 1) и показателей качества исследованных марок углей (см. табл. 2). Массив 2 состоит из нормализованных значений массива 1. Среднеквадратичное отклонение установлено при анализе массива 2.

Изложение материала

Представленный ниже материал является логическим продолжением работы [17], посвященной математическому моделированию предикторов коксохимического производства в зависимости от лага и нулевой инерции.

Результаты анализа 19 исследуемых факторов двух групп – «Марки углей», «Показатели качества углей» и предикторов по функции нормального распределения показали, что из 10 марок углей функция нормального распределения наблюдается для восьми марок (рис. 1, а).

Для марок углей ГЖ (рис. 1, б) и КЖ (рис. 1, в) нормального распределения на функции не наблюдается.

Для показателей качества углей закон нормального распределения характерен для всех показателей, за исключением содержания золы (рис. 2).

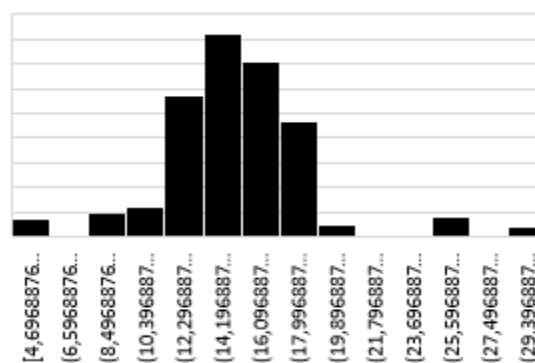
Для исследованных предикторов, нормальное распределение не выявлено для смолы (рис. 3).

F-тест показал, что табличные данные по критерию Фишера (2,42) ниже расчетных для бензола (17,23) и сульфата аммония (11,57). Для смолы расчётный критерий Фишера ниже табличного и составляет 0,47, а для коксового газа находится на сопоставимом уровне (2,37).

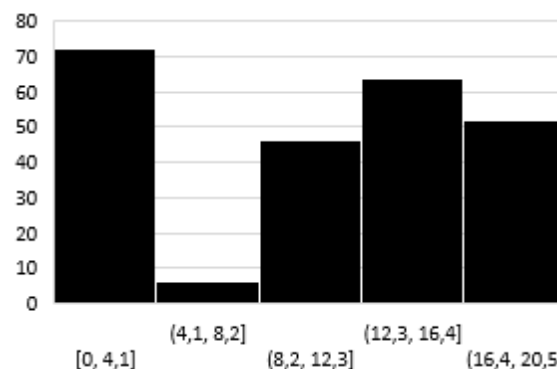
Коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок углей (см. табл. 1), показателями качества углей (см. табл. 2) и попутными продуктами КХП представлены в табл. 4 и 5.

Только для 15 и 17% полученных коэффициентов значение R больше 0,3, что не позволяет установить адекватные корреляционные связи между марками углей (табл. 4), всеми показателями качества углей (табл. 5) и попутными продуктами коксохимического производства.

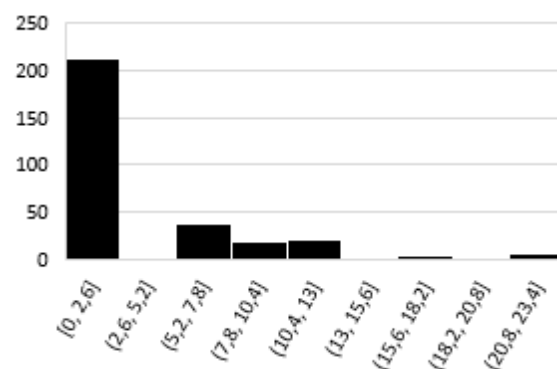
Установленные коэффициенты множественной регрессии, полученные при математической обработке массива данных соотношения марок углей, позволили получить уровень относительной ошибки между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов в пределах 4-20% (табл. 6).



а



б



в

Рис. 1. Распределение Гаусса–Лапласа по исследованным массивам для марок углей: а – КО; б – ГЖ; в – КЖ

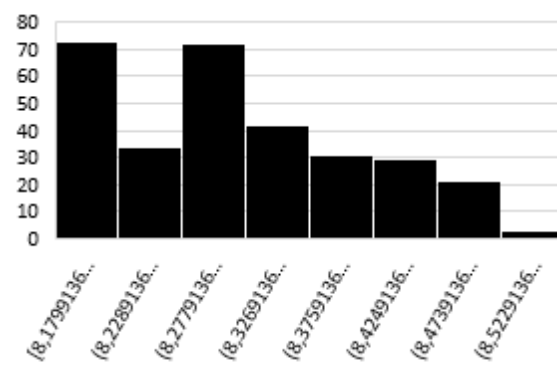


Рис. 2. Распределение Гаусса–Лапласа по золе

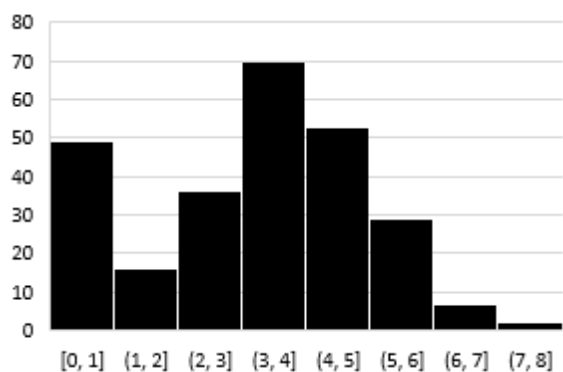


Рис. 3. Распределение Гаусса–Лапласа по смоле

Тем не менее использование на практике для прогнозирования предикторов по коэффициентам множественной регрессии не является адекватным при создании актуальной математической модели, так как анализируемые соотношения углей находятся в узких интервалах колебаний рассмотренных факторов.

В связи с тем, что около 85% всех зависимых факторов имеют низкие корреляционные связи для исследованных предикторов, дальнейший математический анализ выполнили при использовании функции f (рис. 4). Согласно рис. 4, минимальное σ наблюдается при нулевом значении f .

Установлены зависимости между f и фактически-ми суточными значениями исследованных предикторов (рис. 5).

Низкие коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,007-0,040$) на зависимостях между f и фактически-ми суточными значениями предикторов (рис. 5, а, б, г), за исключением зависимости для

сульфата аммония (рис. 5, в) ($R^2 > 0,3$), свидетельствуют об относительно низкой корреляции, необходимой для получения достоверных математических закономерностей.

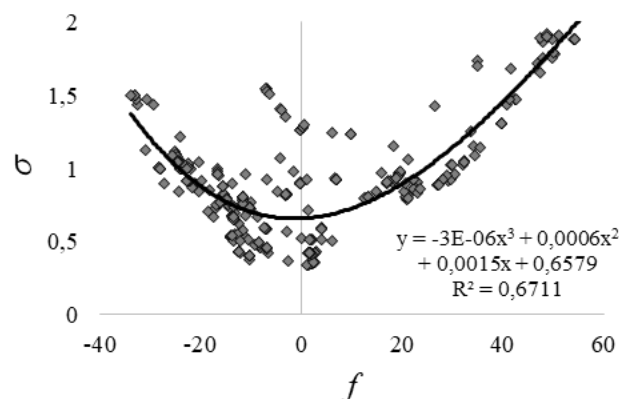


Рис. 4. Зависимость между функцией f и σ по нормализованному массиву

Тем не менее установленные закономерности между f и предикторами позволяют с высокой достоверностью прогнозировать получение попутных продуктов коксохимического производства. В частности, на рис. 6 представлены зависимости между f и предикторами после сортировки по f на 5 или 10 подмассивов.

Полученные зависимости (см. рис. 6) позволяют установить характер технологических закономерностей КХП.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением исследованных марок углей и попутными продуктами КХП

УФп/Марки углей	Г	ГЖО	ГЖ	Ж	КЖ	К	КО	КСН	КС	ОС
Смола	-0,04	0,07	0,05	-0,02	-0,02	-0,09	0,05	0,04	-0,08	-0,07
Бензол	0,24	0,17	-0,48	0,53	0,29	0,05	0,02	-0,03	-0,21	-0,23
Сульфат аммония	-0,14	0,45	0,18	0,01	-0,21	-0,39	0,24	0,26	-0,34	-0,45
Коксовый газ	-0,11	0,15	0,10	-0,09	0,00	-0,16	0,16	0,04	-0,17	-0,11

Таблица 5

Коэффициенты корреляции Пирсона между показателями качества углей и попутными продуктами КХП

ПКУ/Марки углей	W	A	S	Vd	Vdaf	Y	Ro	Io	Ио
Смола	0,06	0,02	-0,02	0,10	0,10	0,02	-0,10	-0,05	0,00
Бензол	0,35	-0,20	-0,25	0,18	0,17	-0,20	-0,22	-0,13	-0,23
Сульфат аммония	0,26	0,05	-0,33	0,55	0,55	0,03	-0,51	-0,43	-0,28
Коксовый газ	0,08	-0,04	-0,04	0,15	0,15	0,06	-0,16	-0,08	-0,05

Таблица 6

Относительная ошибка прогноза при использовании коэффициентов множественной регрессии, %

Смола	Бензол	Сульфат аммония	Коксовый газ
20,2	12,9	7,7	4,1

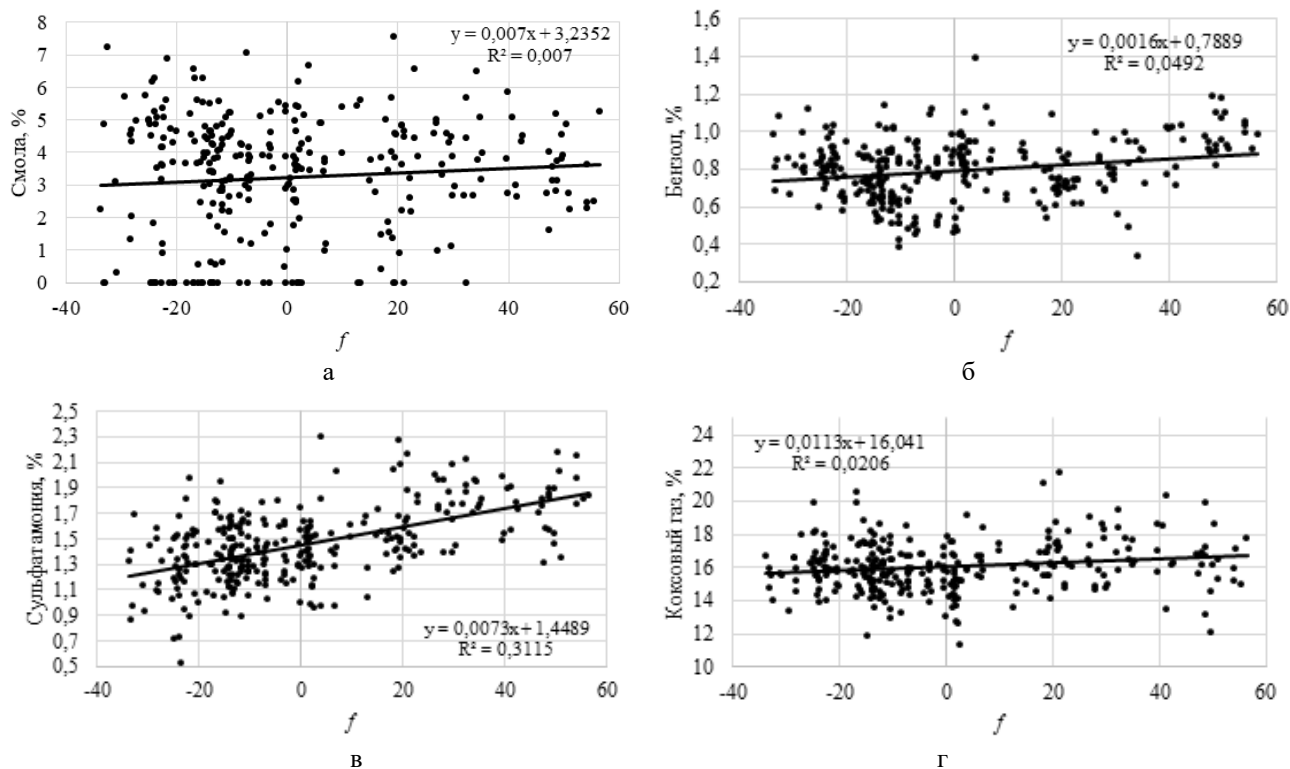


Рис. 5. Зависимость между f и фактическими суточными значениями предикторов: а – смола; б – бензол; в – сульфат аммония; г – коксовый газ

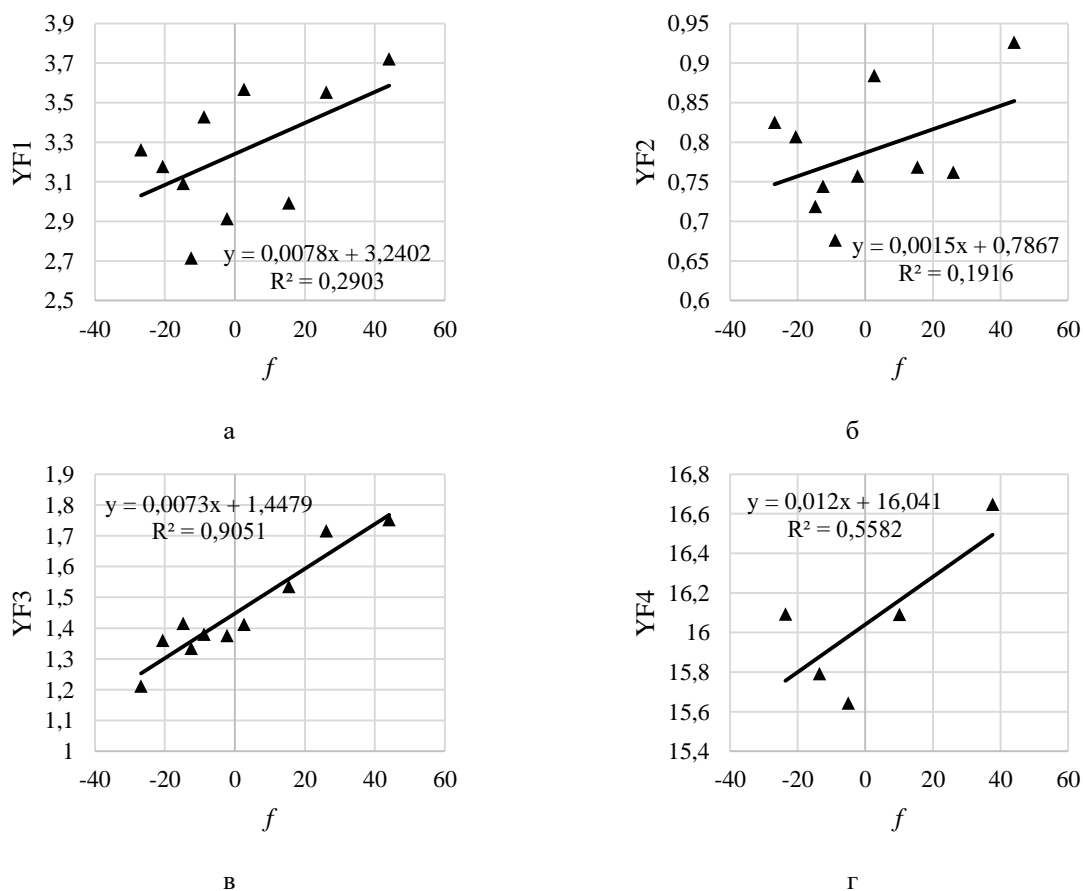


Рис. 6. Зависимости между f и предикторами: а – смола; б – бензол; в – сульфат аммония; г – коксовый газ

Однако при сортировке массива по $YF1$, в частности для смолы, зависимость имеет качественно иной характер (рис. 7), что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов на исследованный предиктор.

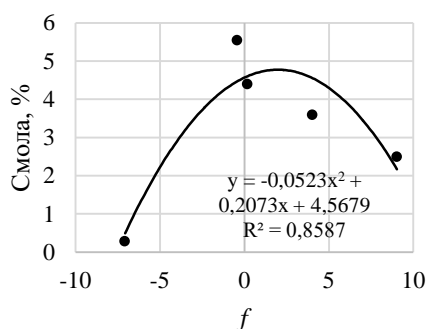


Рис. 7. Зависимость между f и содержанием смолы при сортировке по $YF1$

Таким образом, при помощи математического моделирования сформулированы следующие пункты научной новизны:

— впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением десяти исследованных марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, девяти показателей качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита и четырьмя попутными продуктами коксохимического производства: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа;

— впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями исследованных предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа;

— впервые установлена зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву;

— впервые установлены зависимости между функцией ковариации и фактическими суточными значениями исследованных предикторов: смолы, бензола, сульфата аммония и коксового газа.

Дальнейшие математические исследования направлены прежде всего на:

— определение корреляционных связей между соотношением марок углей и предикторами, в зависимости от изменения суточного шага (лага) и периода суточного смещения (инерции);

— определение влияния периода лага на средне-статистическую корреляционную связь по модулю ($|R|$) для предикторов при фиксированной инерции;

— установление зависимостей между инерцией и $|R|$ для предикторов при увеличении периода лага от 1 суток и более;

— установление зависимостей между инерцией и $|R|$ для предикторов при фиксированном периоде лага отдельно по каждой марке угля.

Для установления наиболее адекватных и максимально точных результатов математического моделирования перспективность дальнейших исследований также планируется продолжить по всем предикторам, сделав акцент на выявлении универсальных критериев, имеющих наиболее математически тесные корреляционные связи с технологическими режимами коксохимического передела.

Выводы

1. Создана аддитивная математическая модель, позволяющая прогнозировать получение попутных продуктов КХП (предикторов): смолы, бензола, сульфата аммония, коксового газа, используя соотношения десяти марок углей, девяти показателей качества углей и производственных мощностей коксохимического производства предприятия с полным металлургическим циклом.

2. Метод построения парных зависимостей и получения коэффициентов множественной регрессии не позволяет с высокой точностью установить достоверные закономерности для построения единой математической модели, описывающей все физико-химические и технологические процессы, характерные для коксохимического производства.

3. Впервые установлены коэффициенты корреляции Пирсона между соотношением марок углей: Г, ГЖО, ГЖ, Ж, КЖ, К, КО, КСН, КС, ОС, показателями качества углей: содержания влаги, золы, серы, индекса основности золы и угля, выхода летучих на сухую и горячую массу, ширины пластического слоя, среднего показателя отражения витринита, и исследованными предикторами.

4. Впервые установлена относительная ошибка прогноза между фактическими и расчётными значениями предикторов.

5. Впервые установлена зависимость между функцией ковариации и среднеквадратическим отклонением по нормализованному массиву.

6. Впервые установлены зависимости между функцией ковариации и фактическими суточными значениями предикторов.

7. Установлено изменение характера зависимости между функцией ковариации и смолой при изменении сортировке массива с f на $YF1$ и появлении точки экстремума, что может свидетельствовать о более сильном влиянии физико-химических, технологических и прочих факторов на исследованный предиктор.

Полученные технологические зависимости и математические закономерности свидетельствуют о сложности физико-химических процессов КХП, что определяет обязательное требование к системному развитию математического аппарата и детализации математического моделирования по каждой марке угля.

Список источников

1. Степанова М.Н., Швалева А.В. Математическое моделирование процессов коксохимического производства с целью оптимизации фракционного состава металлургического кокса // Математика и ма-

- тематическое моделирование : материалы Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ (проектов) обучающихся, Самара, 17–19 апреля 2023 года. Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 145-150.
2. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / А.В. Липатников, А.Е. Шмелева, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 4. С. 30-38.
 3. Кравченко С.А., Абдуллин С.Ю., Тесленко В.С. Совершенствование конструкции пылеосадительных бункеров установок сухого тушения кокса // Экология и промышленность. 2018. № 1(54). С. 38-43.
 4. Исаев М.В., Султангузин И.А. Трехмерное моделирование процессов горения в печной камере коксовой батареи // Кокс и химия. 2010. № 8. С. 34-38.
 5. Математическое моделирование кинетики флотационного обогащения углей с повышенным содержанием тонких классов / В.Н. Петухов, Н.Ю. Свечникова, С.В. Юдина [и др.] // Кокс и химия. 2022. № 1. С. 20-26.
 6. Кластерный анализ результатов экспериментальной оценки выхода химических продуктов коксования / Е.В. Васильева, Т.Г. Черкасова, А.В. Неведров [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2(132). С. 87-96.
 7. Сидоров О.Ю., Аристова Н.А. Математическое моделирование горения отопительного газа в отопительном канале коксовой печи // Кокс и химия. 2017. № 8. С. 23-29.
 8. Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт использования и повышения юзабилити системы математического моделирования производства на металлургическом предприятии // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66, № 1. С. 119-126.
 9. Нейросетевое математическое моделирование при прогнозировании выхода химических продуктов коксования из углей Кузнецкого бассейна / Е.В. Васильева, Т.Г. Черкасова, А.В. Неведров [и др.] // Нефтехимия - 2019 : материалы II Международного научно-технического и инвестиционного форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 16–18 октября 2019 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2019. С. 189-192.
 10. Математическое моделирование процессов теплопереноса и термической деструкции угольной шихты в коксовых печах / А.М. Гюльмалиев, С.Г. Гагарин, В.Н. Трифионов [и др.] // Кокс и химия. 2004. № 9. С. 15-26.
 11. Кравченко С.А., Стельмаченко С.Ю. Углубленный анализ факторов, влияющих на процесс тушения кокса в камере установки сухого тушения кокса, с помощью численного математического моделирования // Кокс и химия. 2019. № 7. С. 41-45.
 12. Определение равномерности горячей прочности и реакционной способности кокса на основе эксперимента и математического моделирования процесса коксования / Ю.В. Коновалова, А.И. Габов, С.Н. Беляничев [и др.] // Кокс и химия. 2006. № 2. С. 31-36.
 13. Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование : учебное пособие для студентов, магистров и аспирантов технических специальностей. Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2010. 141 с.
 14. Панкратов Л.В. Математическое моделирование систем и процессов. Сложные системы : учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2007. 107 с.
 15. Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Часть 1. Новотроицк : Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2022. 108 с.
 16. Куркина Е.С. Автоколебания, структуры и волны в химических системах. Методы математического моделирования : монография. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. 219 с.
 17. Математическое моделирование предикторов коксохимического производства в зависимости от лага и нулевой инерции / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю. [и др.] // Кокс и химия. 2025. № 10. С. 2-14.
 18. Математическое и физическое моделирование определения коррозионной константы для реального и нулевого содержания углерода в трубной стали феррито-бейнитно-перлитного класса / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Сумец А.В., Шабрацкий С.В. // Теория и технология металлургического производства. 2025. №1(52). С. 29-38.
 19. Комплексный математический анализ влияния содержания железа в агломерате на колебания кремния в чугунах / А.М. Новохатский, П.П. Семенюк, В.Н. Шубравый, Р.Е. Великоцкий [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 6(1422). С. 27-36.
 20. Математическое моделирование влияния температуры горячего дутья доменной печи на колебания содержания кремния в чугунах / П.П. Семенюк, Р.Е. Великоцкий, Н.А. Румянцева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9(1425). С. 25-32.
 21. Металловедческий анализ причин отсортировки на зачистку поверхности квадратной заготовки стали 3пс с элементами математического моделирования / Р.Е. Великоцкий, А.В. Сумец, С.В. Шабрацкий, В.С. Малахида // Теория и технология металлургического производства. 2024. № 2(49). С. 49-58.
 22. Разработка математической модели для определения глубины обезуглероживания поверхности слэбов из трубных марок стали / М.И. Мокрицкий, С.А. Сбитнев, Р.Е. Великоцкий, С.В. Куберский // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции, Алчевск, 23–24 октября 2024 года. Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. С. 11-15.

Сведения об авторах

Мокрицкий Максим Игоревич – исполнительный директор, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: mokrickiy@amk-ygmk.ru

Великоцкий Роман Евгеньевич – начальник патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: vr@ro.ru

Никулин Сергей Юрьевич – начальник отдела кадров, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: nikulin_syu@amk-ygmk.ru

Гридин Никита Андреевич – инженер патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: nikyta.gridin@yandex.ru

Шалайкин Стас Романович – инженер патентного отдела, ООО «Южный горно-металлургический комплекс», г. Алчевск, Луганская Народная Республика, Россия. E-mail: stanshalaikin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

MATHEMATICAL FORECASTING OF BY-PRODUCTS OF COKE CHEMICAL PRODUCTION DURING SIMULTANEOUS ANALYSIS OF COAL QUALITY AND CHEMICAL COMPOSITION

Mokritsky Maxim I. – Executive Director, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: mokrickiy@amk-ygmk.ru

Velikotsky Roman E. – Head of the Patent Department, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: vr@ro.ru

Nikulin Sergey Yu. – Head of the HR Department, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: nikulin_syu@amk-ygmk.ru

Gridin Nikita A. – Patent Department Engineer, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: nikyta.gridin@yandex.ru

Shalaykin Stanislav R. – Patent Department Engineer, limited liability company «Southern Mining and Metallurgical Complex», Alchevsk, Russia. E-mail: stanshalaikin@yandex.ru

Abstracts. The paper presents the results of mathematical modeling, which make it possible to synchronously predict the associated products of coking chemical production (CCP) according to four predictors: resin, benzene, ammonium sulfate, coke oven gas, while simultaneously analyzing the ratio of ten grades of coal: G, GZHO, GZH, W, KJ, K, KO, KSN, KS, OS and nine chemical components of coals: moisture content, ash, sulfur, the basicity index of ash and coal, the yield of volatile to dry and hot mass, the width of the plastic layer, the average reflection index of vitrinite. For the first time, Pearson correlation coefficients have been established between the ratio of the studied brands and the chemical components of the coals and the predictors. For the first time, the relative prediction error between the actual and calculated values of the studied predictors has been established. For the first time, a relationship has been established between the covariance function (f) and the standard deviation of the normalized array of studied predictors. For the first time, relationships have been established between f and the actual daily values of the predictors. A change in the nature of the relationship between f and the resin has been observed when the array is sorted from f to the predictor and an extremum point appears, which may indicate a stronger influence of physical, chemical, technological, and other factors. The obtained technological dependencies and mathematical patterns indicate the complexity of the physical and chemical processes in the coal-chemical plant, which determines the mandatory requirement for the systematic development of the mathematical apparatus and the detailed mathematical modeling of each coal grade. In the statistical processing of data and mathematical modeling, methods and algorithms of mathematical analysis and mathematical apparatus developed by the authors of this study were used, adapted to the conditions of unstable operation of an enterprise with a full metallurgical cycle, operating in the front-line zone of military operations.

Keywords: by-products of coke-chemical production, ratios of coal grades, chemical components of coal, resin, benzene, ammonium sulfate, coke oven gas

References

1. Stepanova, M. N. Mathematical modeling of coke-chemical production processes in order to optimize the fractional composition of metallurgical coke / M. N. Stepanova, A. V.

Shvaleva // Mathematics and mathematical modeling: Proceedings of the All-Russian competition of research works (projects) of students, Samara, April 17-19, 2023. Samara: Samara State Technical University, 2023. Pp. 145-150.

2. Optimization of coal raw material consumption at PJSC MMK based on mathematical modeling / A. V. Lipatnikov, A. E. Shmeleva, E. N. Stepanov, D. A. Schneider // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 30-38.
3. Kravchenko, S. A. Improving the design of dust settling bins of coke dry quenching units / S. A. Kravchenko, S. Yu. Abdullin, V. S. Teslenko // Ecology and Industry. 2018, no. 1 (54), pp. 38-43.
4. Isaev, M. V. Three-dimensional modeling of combustion processes in the oven chamber of a coke oven battery and / M. V. Isaev, I. A. Sultanguzin // Coke and Chemistry. 2010, no. 8, pp. 34-38.
5. Mathematical modeling of the kinetics of flotation enrichment of coals with an increased content of fine classes / V. N. Petukhov, N. Yu. Svechnikova, S. V. Yudina [et al.] // Coke and Chemistry. 2022, no. 1, pp. 20-26.
6. Cluster analysis of the results of experimental assessment of the yield of chemical coking products / E. V. Vasilyeva, T. G. Cherkasova, A. V. Nevedrov [et al.] // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2019, no. 2 (132), pp. 87-96.
7. Sidorov, O. Yu. Mathematical modeling of heating gas combustion in the heating channel of a coke oven / O. Yu. Sidorov, N. A. Aristova // Coke and Chemistry. 2017, no. 8, pp. 23-29.
8. Leontiev, A. S. Experience of using and improving the usability of a system for mathematical modeling of production at a metallurgical enterprise / A. S. Leontiev, I. A. Rybenko // News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. 2023, vol. 66, no. 1, pp. 119-126.
9. Neural network mathematical modeling in forecasting the yield of chemical coking products from coals of the Kuznetsk Basin / E. V. Vasilyeva, T. G. Cherkasova, A. V. Nevedrov [et al.] // PETROCHEMISTRY - 2019: Proceedings of the II International Scientific, Technical and Investment Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Refining, Minsk, October 16-18, 2019. Minsk: Belarusian State Technological University, 2019. Pp. 189-192.
10. Mathematical modeling of heat transfer processes and thermal destruction of coal charge in coke ovens / A. M. Gylmaliev, S. G. Gagarin, V. N. Trifonov [et al.] // Coke and Chemistry. 2004, no. 9, pp. 15-26.
11. Kravchenko, S. A. In-depth analysis of factors influencing the coke quenching process in the chamber of a coke dry quenching unit using numerical mathematical modeling / S. A. Kravchenko, S. Yu. Stelmachenko // Coke and Chemistry. 2019, no. 7, pp. 41-45.
12. Determination of the uniformity of hot strength and reactivity of coke based on experiment and mathematical modeling of the coking process / Yu. V. Konovalova, A. I. Gabov, S. N. Belyanichev [et al.] // Coke and Chemistry. 2006, no. 2, pp. 31-36.
13. Bakhvalov, Yu. A. Mathematical modeling: a tutorial for students, masters and graduate students of technical specialties / Yu. A. Bakhvalov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, South-Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). Novocherkassk: SUSU(NPI), 2010. 141 p.
14. Pankratov, L. V. Mathematical modeling of systems and processes. Complex systems: a tutorial / L. V. Pankratov; Russian State Open Technical University of Railway Engineering. Moscow: RGOTUPS, 2007. 107 p.
15. Smirnov, A. N. Mathematical modeling of chemical-engineering processes / A. N. Smirnov, D. I. Alekseev. Volume Part 1. Novotroitsk: National Research Technological University "MISiS", 2022. 108 p.
16. Kurkina, E. S. Self-oscillations, structures, and waves in chemical systems. Methods of mathematical modeling: monograph / E. S. Kurkina; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. Moscow: D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2012. 219 p.
17. Mathematical modeling of predictors of coke-chemical production depending on lag and zero inertia / Mokritsky M. I., Velikotsky R. E., Nikulin S. Yu. [et al.] // Coke and Chemistry. 2025, no. 10, pp. 2-14. 18.
18. Mathematical and physical modeling of determining the corrosion constant for real and zero carbon content in ferrite-bainite-pearlite pipe steel / Mokritsky M.I., Velikotsky R.E., Sumets A.V., Shabratsky S.V. // Theory and technology of metallurgical production. 2025, no. 1 (52), pp. 29-38.
19. Comprehensive mathematical analysis of the influence of iron content in agglomerate on silicon fluctuations in cast iron / A. M. Novokhatsky, P. P. Semenyuk, V. N. Shubray, R. E. Velikotsky [et al.] // Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2018, no. 6 (1422), pp. 27-36.
20. Mathematical modeling of the influence of blast furnace hot blast temperature on variations in silicon content in cast iron / P. P. Semenyuk, R. E. Velikotsky, N. A. Rummyantseva // Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. 2018, no. 9 (1425), pp. 25-32.
21. Metallographic analysis of the causes of sorting for surface cleaning of a square billet of 3ps steel with elements of mathematical modeling / R. E. Velikotsky, A. V. Sumets, S. V. Shabratsky, V. S. Malakhida // Theory and technology of metallurgical production. 2024, no. 2 (49), pp. 49-58.
22. Development of a mathematical model for determining the depth of decarburization of the surface of slabs made of pipe steel grades / M. I. Mokritsky, S. A. Sbitnev, R. E. Velikotsky, S. V. Kubersky // Ways to improve technological processes and equipment for industrial production: Collection of abstracts of reports of the VIII international scientific and technical conference, Alchevsk, October 23–24, 2024. Alchevsk: Donbass State Technical University, 2024. P. 11–15.

Ссылка на статью:

Математическое прогнозирование выходов попутных продуктов коксохимического производства при одновременном анализе соотношения марок и химического состава углей / Мокрицкий М.И., Великоцкий Р.Е., Никулин С.Ю., Гридин Н.А., Шалайкин С.П. // Теория и технология металлургического производства. 2026. №1(56). С. 11-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-11-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-11-21)
 Mokritsky M.I., Velikotsky R.E., Nikulin S.Y., Gridin N.A., Shalaykin S.R. Mathematical forecasting of by-products of coke chemical production during simultaneous analysis of coal quality and chemical composition. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 56, no. 1, pp. 11-21. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1\(56\)-11-21](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-1(56)-11-21)