

# ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ЦЕМЕНТНУЮ ПЕЧЬ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСХОДА И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШЛАМА

---

*valerymag@nm.ru*

**Степовой А.А., аспирант,  
Магергут В.З., д-р техн. наук, проф.**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация:** статья посвящена построению регрессионной модели изменения расхода топлива на цементную печь в зависимости от характеристик и количества сырья подаваемого в печь. Разработанная модель позволит осуществлять прогноз расхода топлива на печь, что положительно скажется на управлении обжигом клинкера.

**Ключевые слова:** обжиг клинкера, модель, химический состав шлама, регрессия, расход топлива, расход шлама.

На современном этапе развития цементного производства во вращающихся печах можно обжигать сырьевые смеси с широким диапазоном химических и физических характеристик и получать при этом клинкер высокой активности. Однако соображения технико-экономической целесообразности обуславливают необходимость применения сырьевых смесей с определенными химическими характеристиками, составы которых могут быть отнесены к рациональным.

В связи с интенсивным развитием цементной промышленности, значительным повышением мощности заводов возникла необходимость использования для производства цемента месторождений сырья часто очень неоднородного по химическому составу, с посторонними включениями и неравномерным распределением вредных примесей [1].

Состав и свойства сырья предопределяются следующими характеристиками [2]:

- химическим составом шлама (процентное содержание основных окислов  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ );
- физическими характеристиками (растекаемость –  $R$ , влажность –  $W$ , потери при прокаливании – ППП, Вес литра);
- значениями коэффициента насыщения ( $KH$ ) и модулей ( $n$  и  $p$ ) –

см. ниже.

Кремнеземный модуль  $n$ , представляющий собой отношение процентного содержания кремнезема  $SiO_2$  к сумме глинозема  $Al_2O_3$  и окиси железа  $Fe_2O_3$ :

$$n = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}.$$

Глиноземный модуль  $p$ , определяющийся отношением процентного содержания глинозема  $Al_2O_3$  в сырьевой смеси к окиси железа  $Fe_2O_3$ :

$$p = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}.$$

Коэффициент насыщения кремнезема известью  $KH$ :

$$KH = \frac{CaO - (1,65 \cdot Al_2O_3 + 0,35 \cdot Fe_2O_3)}{2,8 \cdot SiO_2}.$$

Изменение характеристик сырья оказывает значительное влияние на величину расхода топлива в печи и эффективность обжига.

Влияние характеристик шлама на расход газа описано в [3]. Так увеличение крупности помола, силикатной составляющей, коэффициента насыщения ( $KH$ ) всегда требует более теплонапряженного обжига, следовательно, и увеличения расхода топлива, что, в свою очередь, приводит к увеличению объема и температуры отходящих газов. Теплоемкость растет с повышением содержания  $CaO$  и  $SiO_2$  и снижается при повышении содержания  $Al_2O_3$ .

При увеличении влажности шлама на 1% расход условного топлива на печах увеличивается на 4,3 - 4,5 кг/т.

Согласно расчету сырьевых смесей Себряковского цементного завода, увеличение  $KH$  сырьевых смесей на 0.01 при постоянных модульных характеристиках  $n$  и  $p$  приводит к перерасходу топлива на 0.3 - 0.4 кг.

Таким образом, состав сырьевого шлама является одним из основных параметров, влияющих на режим обжига. Колебания химических и физических свойств шлама вызывают необходимость изменения режима обжига [4]. Возникает задача прогнозирования расхода топлива на основании химического состава шлама.

Для решения поставленной задачи воспользуемся многофакторным корреляционно-регрессионным анализом.

При использовании регрессионного анализа следует учитывать его основное ограничение. Оно состоит в том, что регрессионный анализ позволяет обнаружить лишь зависимости, а не связи, лежащие в основе

этих зависимостей. Регрессионный анализ дает возможность оценить степень связи между переменными путем вычисления предполагаемого значения переменной на основании нескольких известных значений.

Во многих случаях на результативный признак влияет не один, а несколько факторов. Между факторами существуют сложные взаимосвязи, поэтому их влияние на результативный признак комплексное и его нельзя рассматривать как простую сумму изолированных влияний.

Многофакторный корреляционно-регрессионный анализ позволяет оценить степень влияния на исследуемый результативный показатель каждого из введенных в модель факторов, при фиксированных на среднем уровне других факторах. При этом важным условием является отсутствие функциональной связи между факторами [5].

Математически задача корреляционно-регрессионного анализа сводится к поиску аналитического выражения, которое как можно лучше отражало бы связь факторных признаков с результативным, т.е. необходимо найти функцию:

$$\bar{y} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n).$$

Факторами  $x_i$  в нашей модели будут выступать следующие величины: коэффициент насыщения – КН, модули  $n$  и  $p$ , процентное содержание следующих окислов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); влажность шлама –  $W$ , растекаемость –  $R$ , вес литра, потери при прокаливании – ППП, количество шлама подаваемого в печь. В качестве зависимой переменной (отклика)  $\bar{y}$  будет выступать расход газа.

С целью получения математической модели статистические данные работы цементной печи были сняты на предприятии ЗАО «Оскол цемент». Сведения о химическом составе шлама регистрируются каждые 3 часа. Данные о расходе газа один раз в минуту. Т.к. по сравнению с расходом газа данные о химическом составе шлама снимаются реже, то проведем интерполяцию величин, т.е. найдем их промежуточные значения по имеющемуся дискретному набору известных значений, при которой кривая построенной функции проходит точно через имеющиеся точки данных.

Воспользуемся интерполяцией кубическими сплайнами. Сплайн-интерполяция используется для представления данных отрезками полиномов невысокой степени – чаще всего третьей. При этом кубическая интерполяция обеспечивает непрерывность первой и второй производных результата интерполяции в узловых точках. Из этого вытекают следующие свойства кубической сплайн-интерполяции [6]:

- график кусочно-полиномиальной аппроксимирующей функции проходит точно через узловые точки;
- в узловых точках нет разрывов и резких перегибов функции;
- благодаря низкой степени полиномов погрешность между узловыми точками обычно достаточно мала;
- связь между числом узловых точек и степенью полинома отсутствует;
- поскольку используется множество полиномов, появляется возможность аппроксимации функций с множеством пиков и впадин.

Воспользовавшись вышеописанным методом интерполяции, получим недостающие промежуточные точки для характеристик шлама. На рис. 1 приведем пример применения метода интерполяции для процентного содержания  $Al_2O_3$ .



Рисунок 1 – Интерполяция данных о содержании  $Al_2O_3$

Объединив в один массив все данные за два месяца наблюдений, во время которых печь находилась в нормальном режиме обжига цементного клинкера, исключив моменты работы печи в режиме «тихого хода», получим необходимый набор данных для построения модели.

Для целей исследования было использовано следующее уравнение регрессии – уравнение регрессии второго порядка с учетом линейных эффектов, эффектов взаимодействия и квадратичных эффектов факторов:

$$\bar{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot x_i + \sum_{\substack{j,t=1 \\ j \neq t}}^m \beta_{jt} \cdot x_j \cdot x_t + \sum_{k=1}^m \beta_{kk} \cdot x_k^2.$$

Коэффициент  $\beta_0$  называют свободным членом уравнения регрессии; коэффициенты  $\beta_i$  – линейными эффектами; коэффициенты  $\beta_{jt}$  – эффектами взаимодействия; коэффициенты  $\beta_{kk}$  – квадратичными эффектами.

Т.к. при построении регрессионной модели одним из главных требований является независимость факторов между собой, то необходимо исключить факторы которые имеют корреляционную связь. К таковым относятся коэффициент насыщения КН и модульные характеристики  $n$ ,  $p$ , т.к. являются вычисляемыми через другие факторы. Исходя из коэффициентов корреляции факторов, сильной корреляцией обладают следующие пары:  $n$  -  $Al_2O_3$ ,  $n$  -  $Fe_2O_3$ ,  $n$  -  $SiO_2$ ,  $КН$  -  $SiO_2$ ,  $p$  -  $Al_2O_3$ ,  $p$  -  $Fe_2O_3$ . Таким образом, исключив взаимозависимые факторы для результирующей модели, остается 9 факторов  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $W$ ,  $R$ , вес литра, ППП,  $CaO$ , расход шлама.

Обозначим их следующим образом:

Таблица 1 – Факторы для уравнения регрессии

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	W	R	Вес литра	ППП	CaO	Расход шлама

Для 9-ти факторного анализа с использованием линейных эффектов, эффектов взаимодействия и квадратичных эффектов необходимо найти 54 коэффициента.

Вид модели:

$$\begin{aligned}
 Y = & \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_4 \cdot x_4 + \beta_5 \cdot x_5 + \beta_6 \cdot x_6 + \beta_7 \cdot x_7 + \beta_8 \cdot x_8 + \beta_9 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + \beta_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + \beta_{16} \cdot x_1 \cdot x_6 + \beta_{17} \cdot x_1 \cdot x_7 + \beta_{18} \cdot x_1 \cdot x_8 + \beta_{19} \cdot x_1 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + \beta_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + \beta_{26} \cdot x_2 \cdot x_6 + \beta_{27} \cdot x_2 \cdot x_7 + \beta_{28} \cdot x_2 \cdot x_8 + \beta_{29} \cdot x_2 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + \beta_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + \beta_{36} \cdot x_3 \cdot x_6 + \beta_{37} \cdot x_3 \cdot x_7 + \beta_{38} \cdot x_3 \cdot x_8 + \beta_{39} \cdot x_3 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + \beta_{46} \cdot x_4 \cdot x_6 + \beta_{47} \cdot x_4 \cdot x_7 + \beta_{48} \cdot x_4 \cdot x_8 + \beta_{49} \cdot x_4 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{56} \cdot x_5 \cdot x_6 + \beta_{57} \cdot x_5 \cdot x_7 + \beta_{58} \cdot x_5 \cdot x_8 + \beta_{59} \cdot x_5 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{67} \cdot x_6 \cdot x_7 + \beta_{68} \cdot x_6 \cdot x_8 + \beta_{69} \cdot x_6 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{78} \cdot x_7 \cdot x_8 + \beta_{79} \cdot x_7 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{89} \cdot x_8 \cdot x_9 + \\
 & \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \beta_{33} \cdot x_3^2 + \beta_{44} \cdot x_4^2 + \beta_{55} \cdot x_5^2 + \beta_{66} \cdot x_6^2 + \beta_{77} \cdot x_7^2 + \beta_{88} \cdot x_8^2 + \beta_{99} \cdot x_9^2
 \end{aligned}$$

Найдя коэффициенты уравнения и, исключив не значимые (по критерию Стьюдента) коэффициенты, получаем искомую регрессионную модель. Характеристики полученной модели:

RMSE = 192.966 - корень квадратный из средней квадратической ошибки.

$R^2=0.262164$ , коэффициент детерминации, показывающий какая часть общей дисперсии может быть объяснена регрессионной моделью.

Коэффициент корреляции между реальным расходом газа и моделью – 0,464224.

Приведем корреляционное поле (рис.2), показывающее взаимосвязь реального расхода газа на печь с расходом газа вычисленного по найденной модели.

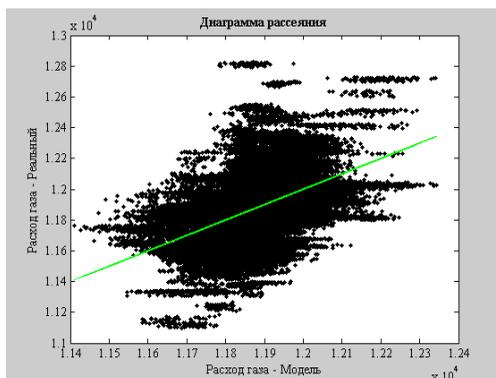


Рисунок 2 – Корреляционное поле Расход газа (модель) – Реальный расход газа

Фрагмент данных, для сравнения работы моделей приведен на рис. 3.

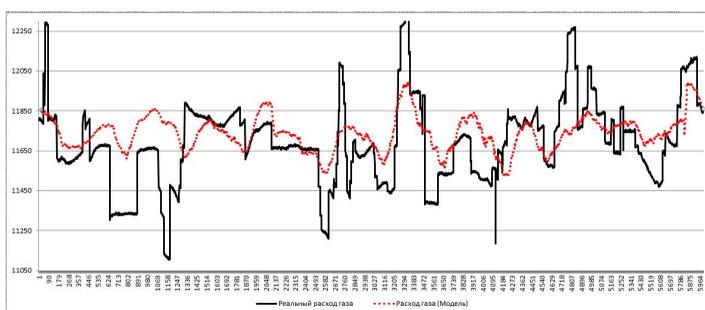


Рисунок 3 – Сравнение результатов модели с реальными данными

Методом множественной корреляции были получены уравнения регрессии для отражения зависимости, между химическим составом шлама подаваемого в печь и расходом топлива. Полученное уравнение

регрессии, позволит прогнозировать объёмы газа подаваемого в печь.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р\_офи\_м» и Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.*

#### **Список литературы:**

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. М.: Стройздат, 1990. 224 с.
2. Мельник М.Т., Берхоер И.Д., Ковалёв Ю.С. Расчёты сырьевых смесей и материального баланса цементного завода. Киев: Вища школа, 1972. 148 с.
3. Беседин П.В., Трубаев П.А. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера. Белгород: Изд-во БГТУ 2005. 460 с.
4. Нусс М.В., Трубаев П.А., Классен В.К. Управление работой цементной вращающейся печи // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 61–65.
5. Чубукова И.А. Data Mining. М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином, Лаборатория знаний, 2008. 384 с.
6. Поляков А.Н. Использование системы Matlab в математическом моделировании станков. Базовые положения системы. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. 76 с.