

УДК 621.764:621.928.6

к.т.н. Корчевский А. Н.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, korchevskiyal@mail.ru),
Холодов К. А.
(ООО «ПрофЛайн», г. Саратов, Россия),
д.т.н. Сергеев П. В.
(ООО «Ресурс-Инжиниринг-Донбасс», г. Донецк, ДНР)

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ АНТРАЦИТОВ НА КОНЦЕНТРАЦИОННОМ СТОЛЕ

Методом планирования эксперимента разработана и проанализирована регрессионная модель процесса обогащения антрацитовых шламов на концентрационном столе опорного бигармонического типа СКОБ-2,5×2М. Исследовано влияние на процесс пяти факторов: удельного расхода смывной воды; размаха колебаний деки стола; нагрузки по питанию; продольного и поперечного углов наклона деки. Установлено, что наиболее значимым фактором является нагрузка по питанию, наименее — углы наклона деки. Прослеживается четкая экстремальная зависимость эффективности процесса разделения от всех исследуемых параметров. Это позволило решить задачу оптимизации процесса обогащения на концентрационном столе — определены координаты экстремума-максимума целевой функции (эффективности разделения по Ханкоку — Луйкену) в факторном пространстве.

Ключевые слова: концентрационный стол, антрацитовые шламы, планирование эксперимента, регрессионная модель.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Концентрационные столы находят широкое применение при гравитационном обогащении мелкозернистого материала при переработке оловянных, вольфрамовых, золотосодержащих и других руд и россыпей редких и благородных металлов, а также углей и антрацитов, разделяемые минералы которых характеризуются значительным различием в их плотности.

В последние годы эти аппараты находят все более широкое применение в угольной отрасли для предварительной переработки горной массы шахт для снижения зольности рядового угля и антрацита и количества перевозимой пустой породы, а также для вторичной стадии утилизации породугольных отвалов [1].

Эффективность использования концентрационных столов в углеобогащении во многом определяется их конструктивными особенностями, а также свойствами исходного материала. В связи с этим разработка рациональных основ применения этих аппа-

ратов в практике углепереработки является актуальной научно-технической задачей.

Целью данной работы является изучение процесса обогащения антрацитов на концентрационном столе.

Объект исследования — технология обогащения антрацитовых шламов.

Предмет исследования — закономерности обогащения антрацитов на концентрационном столе.

Задачи исследования:

– разработка регрессионной модели процесса обогащения антрацитов на концентрационном столе;

– определение характера и степени влияния на процесс разделения исследуемых параметров.

Методика исследования. Испытания проводились на концентрационном столе СКОБ-2,5×М фирмы «Ресурс-Инжиниринг-Донбасс» [2]. Объектом исследований являлись породные отвалы ООО «Восток-Юг» (г. Новошахтинск, Ростовская обл., Россия) крупностью 0–3 мм и зольностью 55 %. Со-

держание твердого в исходном питании стола — 30 %.

Исследования процесса обогащения на концентрационном столе осуществлялись с использованием метода планирования активного факторного эксперимента. При этом для разработки регрессионной модели применен ротатбельный центрально-композиционный план эксперимента, который обеспечивает одинаковую точность модели во всем гиперпространстве [3].

Функция отклика — эффективность процесса по Ханкоку — Луйкену (E , %). Исследовалось влияние на процесс обогащения пяти основных факторов, избранных на основании данных технической литературы и предварительных испытаний: удельного расхода смывной воды (X_1); размаха колебаний деки стола (X_2); нагрузки по питанию (X_3); продольного угла наклона деки (X_4); поперечного угла наклона деки (X_5). Выбранные факторы удовлетворяют требованиям управляемости, взаимонезависимости, однозначности, каким должны удовлетворять вариативные факторы при планировании эксперимента.

Был реализован полный факторный эксперимент типа 2^5 со звездными точками. Экспериментальная область факторного пространства и условия кодирования факторов показаны в таблице 1.

Разработка плана эксперимента и матрицы планирования, а также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены с помощью модуля «Планирование эксперимента» статистического пакета Statgraphics Plus [4, 5].

Остановимся на анализе полученных результатов. Наиболее удобно и наглядно значимость коэффициентов модели можно проверить с помощью Парето-графика (рис. 1). Горизонтальные столбцы, пересекающие вертикальную линию, отвечающую 95 % доверительной вероятности, свидетельствуют о статистической значимости соответствующих коэффициентов модели.

Как видно из Парето-графика (рис. 1), статистически значимыми являются коэф-

фициенты при линейных и квадратичных членах уравнения регрессии, а также часть коэффициентов при членах, которые отвечают парным взаимодействиям факторов. Статистически незначимыми оказались коэффициенты при парных взаимодействиях X_1X_2 , X_1X_4 , X_2X_5 и X_4X_5 . С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет вид

$$E = 96,3 + 0,93X_1 + 0,82X_2 - 1,13X_3 + 0,40X_4 - 0,41X_5 - 4,89X_1^2 - 0,85X_1X_3 - 0,78X_1X_5 - 3,15X_2^2 - 0,47X_2X_3 + 0,47X_2X_4 - 3,41X_3^2 - 0,55X_3X_4 + 0,88X_3X_5 - 5,18X_4^2 - 1,33X_5^2.$$

Парето-график (рис. 1) дает представление о сравнительной значимости входных факторов для исследуемого процесса. Увеличение длины горизонтальных столбцов свидетельствует об увеличении влияния на процесс соответствующего фактора. Столбцы, цвет которых отмечен знаком плюс, отвечают факторам и их парным взаимодействиям, которые способствуют росту целевой функции E . И, наоборот, столбцы, цвет которых отмечен знаком минус, отвечают факторам и их парным взаимодействиям, которые способствуют уменьшению значений целевой функции.

Адекватность регрессионной модели изучаемому процессу подтверждается высоким значением коэффициента детерминации $R^2 = 98,09\%$ и показателя «потери согласия функции (Lack-of-fit)» $P = 0,23$ (что значительно больше критического значения; $P_k = 0,05$) [4].

На рисунке 2 показана взаимосвязь полученных (observed) и расчетных (predicted) данных. Как видно из рисунка 2, различие между экспериментальными и расчетными значениями функции отклика минимальное — большинство экспериментальных точек находятся в окрестности прямой. Это также подтверждает адекватность полученной модели изучаемому процессу.

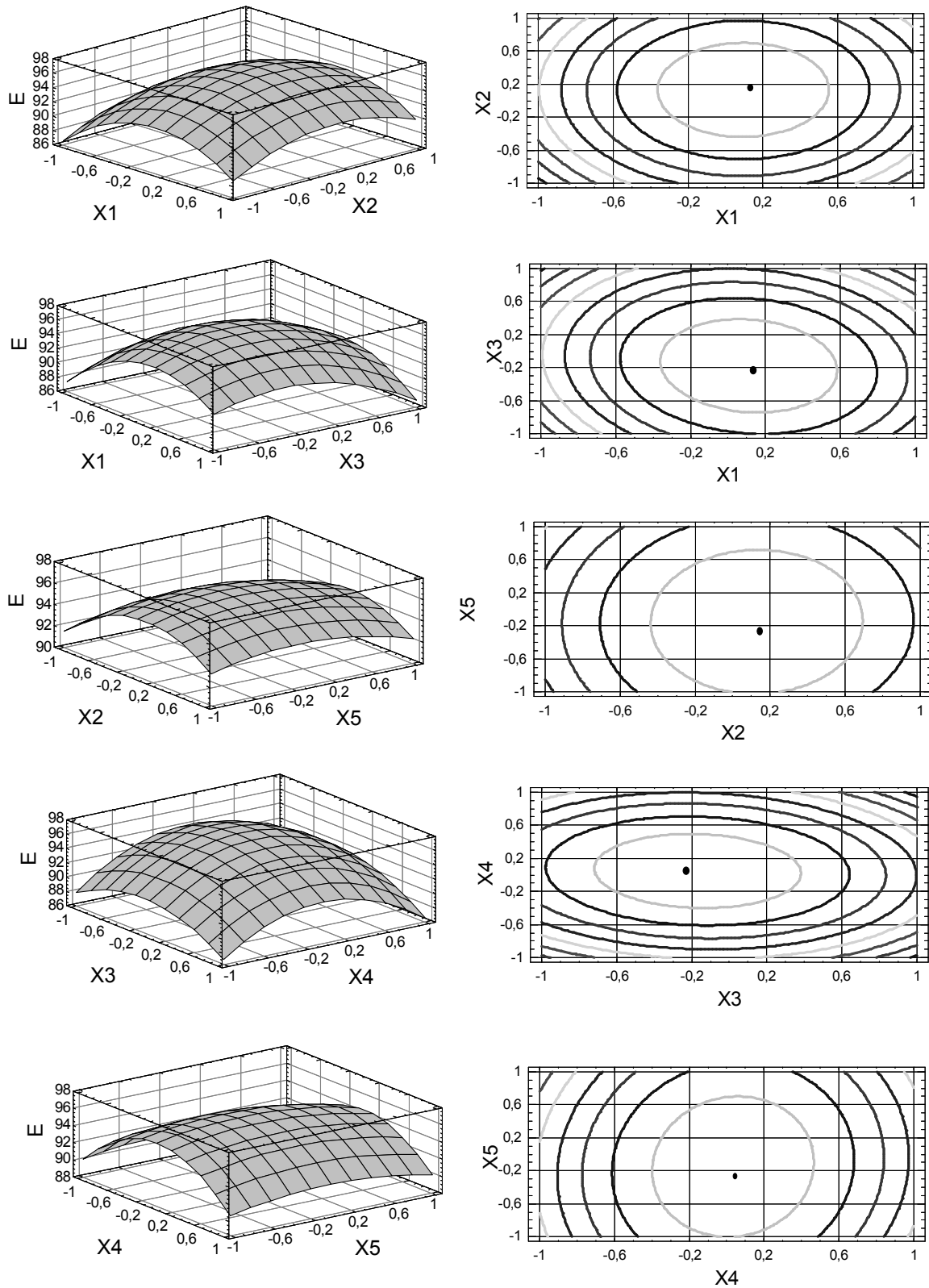


Рисунок 3 Частные трехмерные сечения поверхности отклика и их контурные кривые (точками на контурных кривых показаны координаты экстремума-максимума E)

Оптимальное значение размаха колебаний деки во многом зависит от крупности исходного питания стола. Обычно большая амплитуда и размах колебаний лучше для крупного питания, а наоборот — для тонких частиц. Тонкие частицы имеют склонность, входя в контакт с декой стола, прилипать к ее поверхности более прочно, чем относительно крупные. Меньшие амплитуда и размах колебаний помогают преодолеть это явление.

Наименее значимыми являются факторы, определяющие положение деки стола в пространстве — X_4 «Угол продольного наклона деки» и X_5 «Угол поперечного наклона деки». Практика показывает, что продольный и поперечный углы наклона деки стола ограничено влияют на механизм разделения в межрифельном пространстве. Эти параметры существенно влияют на транспортировку частиц вдоль и поперек деки. В наших испытаниях рост фактора X_4 сопровождается некоторым увеличением, а фактора X_5 — уменьшением значения функции отклика E . Обычно оптимальные значения отмеченных углов устанавливаются экспериментально.

Как видно из рисунка 3, прослеживается четкая экстремальная зависимость функции отклика E от исследуемых параметров. Это позволяет решать задачу оптимизации процесса обогащения на концентрационном столе. Расчетное максимальное значение функции отклика $E=96,6\%$. При этом оптимальные значения факторов составляют: $X_1=0,13$; $X_2=0,15$; $X_3=-0,23$; $X_4=0,05$; $X_5=-0,26$.

В пересчете на натуральные значения факторов имеем: $x_1=2,1 \text{ м}^3/\text{ч}\cdot\text{т}$; $x_2=8,3 \text{ мм}$;

$x_3=4,7 \text{ т/ч}$; $x_4=3,1 \text{ град.}$; $x_5=4,5 \text{ град.}$ Реализация контрольного эксперимента с указанными оптимальными значениями факторов дает значение функции отклика $E=96,1\%$. Близость экспериментального и расчетного значений экстремума-максимума функции отклика E является еще одним подтверждением адекватности полученной регрессионной модели.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс разделения антрацитовых шламов на концентрационном столе СКОБ-2,5×2М.

2. Определены характер и степень влияния на процесс разделения на столе основных технологических параметров: удельного расхода смывной воды; размаха колебаний деки стола; нагрузки по питанию; продольного и поперечного углов наклона деки. Установлено, что наиболее значимым есть фактор «нагрузка по питанию», наименее — углы наклона деки.

3. В связи с экстремальным характером зависимости эффективности разделения от исследуемых факторов решена задача по оптимизации процесса обогащения антрацитовых шламов на концентрационном столе.

Проведенные исследования позволили оценить области рациональных значений режимных параметров процесса разделения, что, в свою очередь, дает возможность эффективного применения концентрационных столов в практике углепереработки.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку математической модели движения рабочего органа концентрационного стола СКОБ-2,5×2М.

Библиографический список

1. Корчевский, А. Н. Исследование разделения отходов на концентрационном столе [Текст] / А. Н. Корчевский, К. В. Гуменюк, Е. И. Назимко // *Proceedings of the XII national Conference with international participation of the open and underwater mining of minerals. — Bulgaria, 2013. — P. 381–388.*
2. Корчевский, А. Н. Моделирование конструктивных и проектных параметров концентрационного стола типа СКОБ [Текст] / А. Н. Корчевский, Г. Г. Гордеев // *Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. — Дніпропетровськ : НГУ, 2016. — 62(103). — С. 99–108.*

3. Налимов, В. Г. Логические основания планирования экспериментов [Текст] / В. Г. Налимов, Т. И. Голикова. — М. : Металлургия, 1981. — 152 с.

4. Дюк, В. Обработка данных на ПК в примерах [Текст] / В. Дюк. — СПб. : Питер, 1997. — 240 с.

5. Сергеев, П. В. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин [Текст] : практикум / П. В. Сергеев, В. С. Білецький. — Східний видавничий дім, 2016. — 119 с.

© Корчевский А. Н.

© Холодов К. А.

© Сергеев П. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. РМПИ ДонНТУ Петренко Ю. А., д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В., к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А.

Статья поступила в редакцию 28.10.2020.

PhD in Engineering Korchevskiy A. N. (DonNTU, Donetsk, DPR, korchevskiyal@mail.ru),
Kholodov K. A. (ООО “ProfLine” (Limited Liability Company), Saratov, Russia), **Doctor of Technical Sciences Sergeev P. V.** (ООО “Resource-Engineering-Donbass” (Limited Liability Company), Donetsk, DPR)

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF REGRESSION MODEL OF ANTHRACITE ENRICHMENT PROCESS ON THE CONCENTRATION TABLE

The experimental design method was used to develop and analyze a regression model of the process of anthracite slime enrichment on the concentration supporting table of bigarmonic type СКОБ-2,5×2М. The influence of five factors on the process was investigated: the specific flow rate of flush water; range of table deck oscillation; power supply loads; longitudinal and transverse angles of deck inclination. It was determined that the most significant is the “power load” factor, the least — angles of deck inclination. There is a clear extreme dependence of the efficiency of separation process on all the studied parameters. This allowed to solve the problem of optimizing the enrichment process on the concentration table — the coordinates of the extremum-maximum of the objective function (Hancock — Luiken separation efficiency) in the factor space were determined.

Key words: concentration table, anthracite slimes, experimental design, regression model.