

УДК 622.764:621.928.6

**А.Н. КОРЧЕВСКИЙ**, канд. техн. наук

(Украина, Донецк, Государственное ВУЗ "Донецкий национальный технический университет"),

**Г.Г. ГОРДЕЕВ**, канд. физ.-мат. наук

(Украина, Макеевка, Государственное ВУЗ "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры")

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО СТОЛА ТИПА СКОБ**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Поиск новых методов и средств повышения эффективности обогащения полезных ископаемых заставляет более глубоко подвергать анализу принципов работы и технологического управления аппаратов гравитационного разделения с оценкой экономической и экологической эффективности. Бигармонические вибрационные столы типа СКОБ-2,5×2, СКОБ-2,5×3 стали широко применяться в последние годы при комплексной переработке объектов техногенного характера – шламотстойники угольных и металлургических предприятий, породные терриконы, шлаковые отвалы. Концентрационные столы – аппараты гравитационного типа обогащения полезных ископаемых, в которых основной рабочий орган разделения есть дека. Дека представляет собой плоскую поверхность, имеющую возможность варьирования продольного и поперечного углов наклона, с системой нарифления. Система нарифления выполняется различной геометрической конфигурации в соответствии с адаптацией к конкретному материалу со своими свойствами вещественного, гранулометрического и фракционного составов. Разделяющей средой является техническая вода, движущаяся по наклонной плоскости, обычно перпендикулярно вектору направленных колебаний деки. Отыскание области оптимальных значений управляющих факторов, влияющих на эффективность разделения, есть основная задача по определению конструктивных и проектных параметров при создании аппаратов данного типа.

*Анализ исследований и публикаций.*

В 60-70 годах прошлого столетия на ряде углеобогатительных фабриках Донбасса эксплуатировались концентрационные столы подвешенного исполнения типа СКПМ-6, опорного исполнения типа ЯСК-1 и СКМ-1. Технологическое назначение концентрационных столов состояло в переработке машинных классов 0-13, 0-6, 0-3 и 0-1 мм [1]. Приемлемая эффективность работы концентрационных столов при обогащении углей имеет практические доказательства. Кроме того установлено, что при наличии свободных зерен пирита в питании, они удаляются в отходы. При этом происходит обессеривание шламов путем выделения свободной пиритной серы в классах крупностью до 3 мм [1, 2].

Концентрационные столы могут использоваться и при разделении отходов других производств, например для таких объектов, как шлаки и шламы различных металлургических производств.

*Постановка задачі.* Аналіза конструктивних особливостей вібраційного бігармонічного концентраційного стола на основі побудови моделей кінематичного аналізу і факторного експерименту дає можливість визначення раціональних режимів роботи. Ці дані дають можливість розробки конструкторської документації для виготовлення обогатительного обладнання, яке повинно забезпечувати задані технологічні характеристики. Результатом роботи є конструкторська документація концентраційних столів типу СКОБ (рис. 1). Конструктивна схема враховує взаємодію всіх параметрів, впливаючих на управління технологічної ефективністю розділення, як конструктивних жорстко заданих, так і змінюючихся непрямою в часі переробки експлуатаційної навантаження. Отримані аналітичні залежності для визначення параметрів руху будь-якої точки робочого органу – деки.

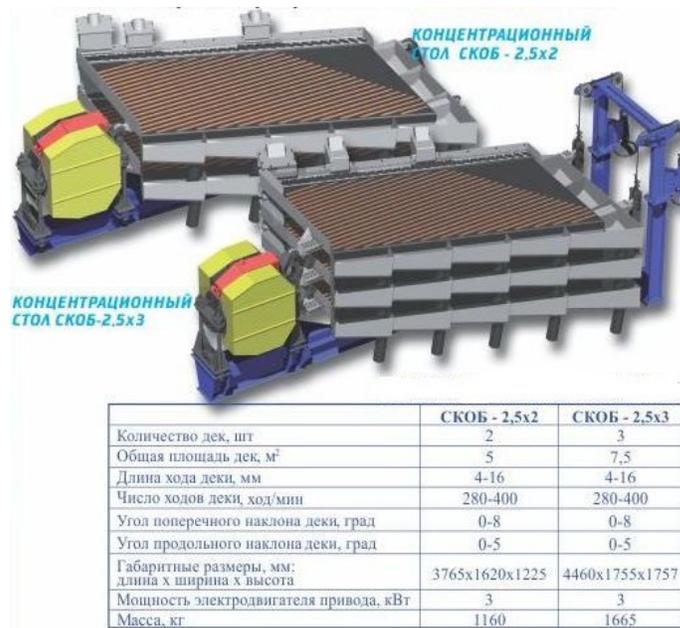


Рис. 1. Общій вид і технічна характеристика концентраційних столів типу СКОБ

*Изложение материала и результатов.* Побудована математична модель концентраційного стола [2, 3, 5]. Конструкція представлена системою тел (рис. 2), основне тіло якого дека 1, опираючись на чотири опори - невідомі тяги 3, 4 і 5, 6 шарнірно кріплючись до рами 2. Первинне положення цих опор визначається регульованими за допомогою спеціальних пристроїв кутами  $\varphi_{10}$ ,  $\varphi_{20}$ ,  $\varphi_{30}$ ,  $\varphi_{40}$ . В вертикальній площині механізм подібний шарнірному чотиризв'язковому, знаходячись на нахилній площині.

Рух механізму здійснюється за допомогою привода (в комбінації електродвигач – ексцентрик вібробудувач 8-9), з кінематичною схемою на основі жорсткого інерційного ексцентрика. Кріплення привода до деки здійснюється в одній точці за допомогою шарніра.

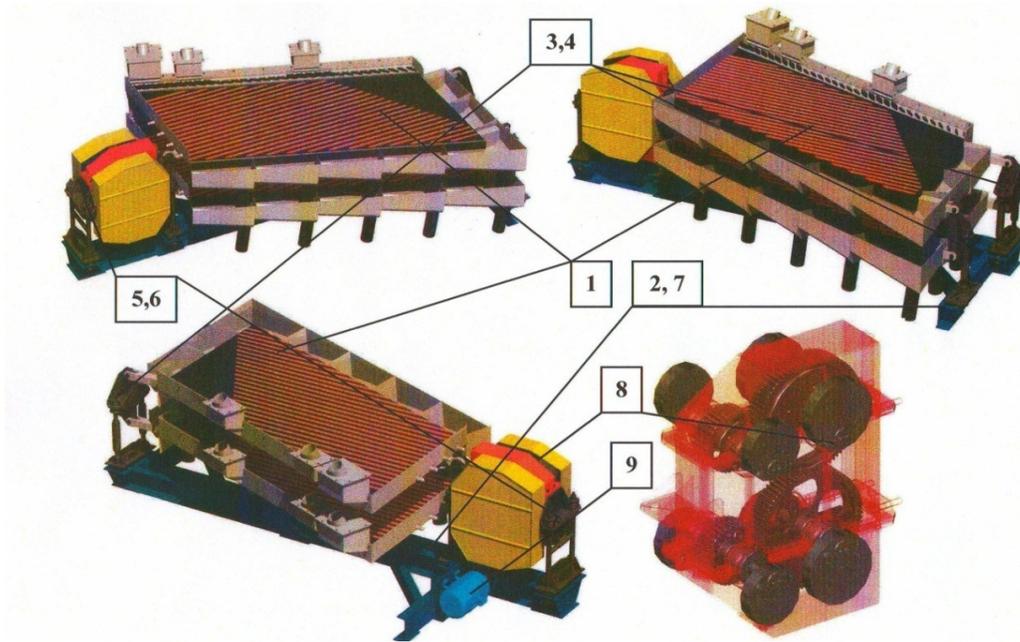


Рис. 2. Конструкция концентрационного стола типа СКОБ:

- 1 – дека; 2 – опорная подвижная рама; 3, 4 – передние опоры; 5, 6 – задние опоры;  
7 – стационарная рама опорная рама; 8 – эксцентриковый вибровозбудитель;  
9 – электродвигатель

Распределение масс (момент инерции) деки могут быть изменены с помощью угла, определяющийся между декой и горизонталью. Данный угол конструктивно управляется специальным регулирующим устройством.

Механическая система, которой моделируется конструкция концентрационного стола, имеет одну степень свободы. За обобщенную координату выбран угол поворота одной из тяг  $\varphi_1(x = \varphi_1)$ .

Без ограничений на движение деки получено нелинейное уравнение движения механизма концентрационного стола, которое имеет вид:

$$x + a_1(x)x + b_1(x)x + c_1(x) = 0. \quad (1)$$

Если обозначить  $\dot{x} = y$  и от дифференцирования по времени перейти к дифференцированию по  $x$ , то это дифференциальное уравнение второго порядка можно записать в виде дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dy}{dx} + a(x)y^2 + b(x)y + \frac{c(x)}{y} = 0. \quad (2)$$

Коэффициенты  $a(x)$ ,  $b(x)$ ,  $c(x)$  уравнения зависят от  $x$  в них входят основные параметры механизма концентрационного стола  $\varphi_{10}$ ,  $\varphi_{20}$ ,  $\varphi_{30}$ ,  $\varphi_{40}$ ,  $u$ ,  $\gamma$ , определяющие его конфигурацию, и от которых зависит процесс разделения.

Решая это уравнение можно определить поле скоростей и поле ускорений точек деки, с помощью которых можно вычислить силы инерции частиц материала, находящегося на ней в процессе обогащения на наклонной деке в потоке воды.

Целесообразно рассмотреть линейную модель, решение уравнений которой можно записать в аналитическом виде.

Решение нелинейного уравнения движения механизма концентрационного стола возможно только приближенно с помощью численных методов с применением математических компьютерных пакетов программ.

Однако возможно и качественное исследование, так как дифференциальное уравнение второго порядка можно представить в виде системы двух дифференциальных уравнений первого порядка, а методы исследования двумерных динамических хорошо разработаны и применяются в различных областях техники.

В случае малых отклонений обобщенной координаты и обобщенной скорости от их значений в равновесном состоянии, уравнение задачи можно записать в виде линейного дифференциального уравнения второго порядка с переменными коэффициентами:

$$\ddot{x} + k^2 x = f(x), \quad (3)$$

в котором правая часть имеет гармонический вид:

$$f(t) = A \sin(\omega t + \beta) \quad (4)$$

и задает возмущающую колебания силу. В этом случае решение может быть получено в аналитическом виде. Полученное решение позволяет вычислить скорость и ускорение любой точки деки концентрационного стола, то есть получить планы скоростей и ускорений ее точек. Эти скорости и ускорения будут начальными для движения частиц материала, подвергающегося концентрации и определяют их силы инерции. Эти силы являются основными для процесса разделения. Управлять этими силами инерции можно с помощью конструктивных параметров механотронной системы концентрационного стола. Управляющие параметры обеспечивают распределение колеблющихся масс изделия и присоединенной массы материала, геометрическую конфигурацию траекторий, скоростей и ускорений колебаний каждой точки деки.

Динамические составляющие колебаний деки зависят от координат расположения точки действия возбуждающей силы к деке от присоединенного вибровозбуждающего механизма. Учет этого фактора имеет важное значение при расчете динамических характеристик на этапе конструирования и проектирования данного типа машин.

Для уточнения степени влияния конструктивных параметров на техноло-

## **Гравітаційна сепарація**

гические показатели работы концентрационного стола проведен полный факторный эксперимент с пятью факторами управления.

Разработка и исследование регрессионной модели процесса обогащения на промышленном варианте вибрационного бигармонического концентрационного стола.

Исследования процесса обогащения на концентрационном столе осуществлялись с использованием метода планирования активного факторного эксперимента. При этом для разработки регрессионной модели применен рототабельный центрально-композиционный план эксперимента, который обеспечивает одинаковую точность модели во всем гиперпространстве [6, 7].

Функция отклика – эффективность процесса по Ханкоку-Луйкену  $E$ , % [2, 3, 4]. Исследовалось влияние на процесс обогащения пяти основных факторов, избранных на основании априорных данных [3,4]: удельного расхода 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.

Таблица 1

Область факторного планирования

Параметр	Обозначение	Код	Ед. измерения	Шаг	Уровни		
					-1	0	+1
Удельный расход воды	$q_v$	$X_1$	м <sup>3</sup> /ч т	0,5	1,5	2	2,5
Размах колебаний	$A$	$X_2$	мм	2	6	8	10
Нагрузка по питанию	$Q$	$X_3$	т/ч	1,5	3,5	5	6,5
Продольный угол наклона деки	$\alpha$	$X_4$	град.	1	2	3	4
Поперечный угол наклона деки	$\beta$	$X_5$	град.	2	3	5	7

Обработка результатов экспериментов выполнена с помощью модуля "Планирование эксперимента" статистического пакета "Statgraphics Plus".

Остановимся на анализе полученных результатов. Как видно из парето-графика (рис. 3), статистически значимыми являются коэффициенты 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  $X_4X_5$ .



## **Гравітаційна сепарація**

---

На рис. 5 представленны трехмерные сечения (поверхности) многомерной функции отклика  $E$ . При этом значения других факторов принимались на нулевом уровне.

Как видно из уравнения регрессии и паретто-графика (рис. 3) наиболее значимым среди исследованных есть фактор  $X_3$  "Нагрузка по питанию". С увеличением  $X_3$  наблюдается существенное снижение эффективности процесса разделения на концентрационном столе, что полностью соответствует теоретическим представлениям и опыту эксплуатации оборудования.

Вторым и третьим по значимости являются факторы  $X_1$  "Удельный расход воды" и  $X_2$  "Размах колебаний" соответственно. Рост каждого из этих факторов сопровождается увеличением эффективности разделения.

Наименее значимыми являются факторы, определяющие положение деки стола в пространстве –  $X_4$  "Угол продольного наклона деки" и  $X_5$  "Угол поперечного наклона деки". При этом рост фактора  $X_4$  сопровождается увеличением, а фактора  $X_5$  уменьшением значения функции отклика  $E$ .

Как видно из рис. 5, прослеживается четкая экстремальная зависимость функции отклика  $E$  от исследуемых параметров. Это позволяет решать задачу оптимизации процесса обогащения на концентрационном столе.

Координаты экстремума-максимума  $E$  показаны на рис. 6. Как видно из рисунка, расчетное максимальное значение функции отклика  $E = 96,64\%$ . При этом оптимальные значения факторов составляют:

$$X_1 = 0,134976; X_2 = 0,148195; X_3 = -0,230456; X_4 = 0,0462838; X_5 = -0,261807.$$

В пересчете на натуральные значения факторов имеем:

$$X_1 = 2,07 \text{ м}^3/\text{ч}\cdot\text{т}; X_2 = 8,29 \text{ мм}; X_3 = 4,65 \text{ т/ч}; X_4 = 3,05 \text{ град.}; X_5 = 4,48 \text{ град.}$$

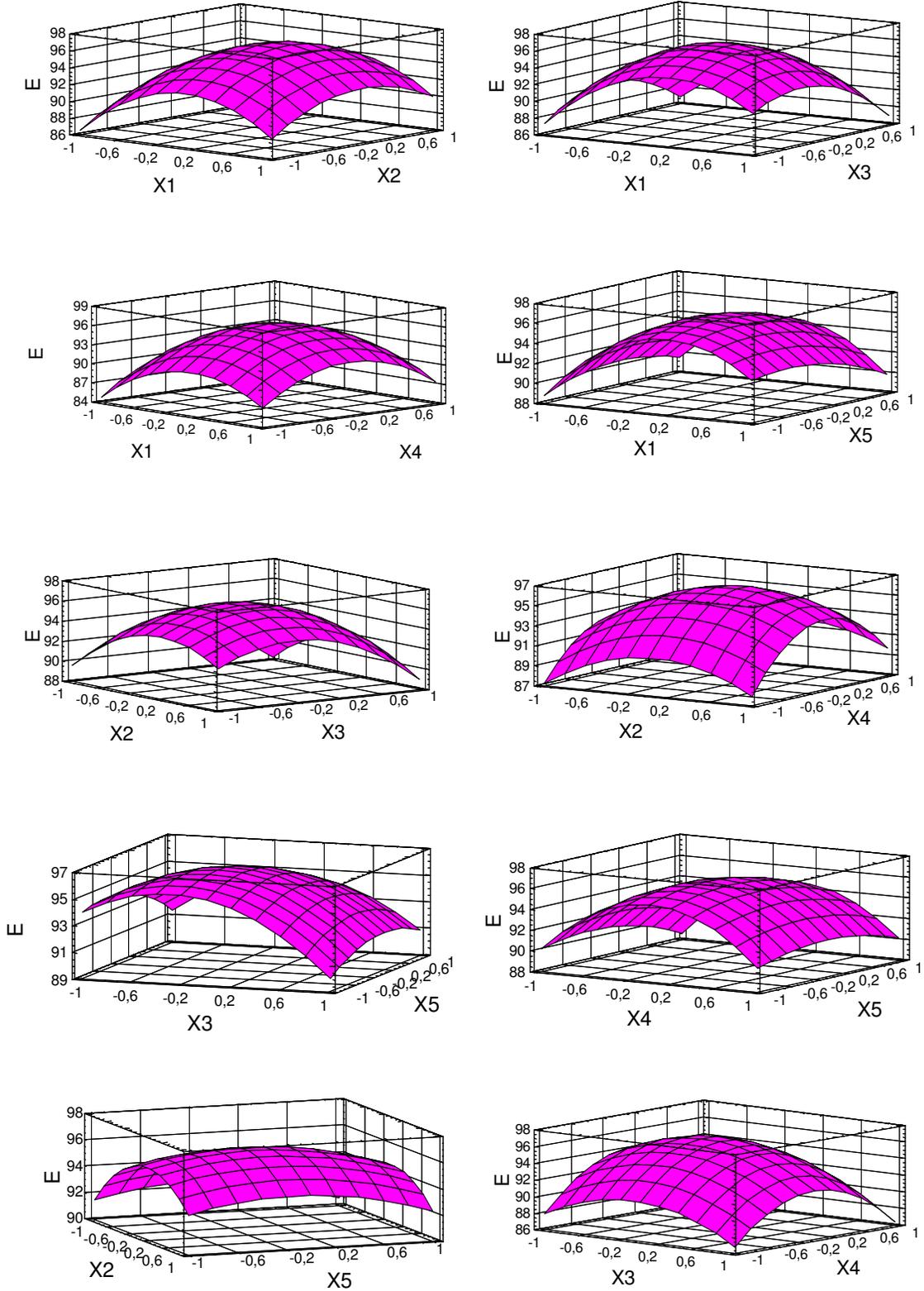


Рис. 5. Трехмерные сечения поверхности функции отклика  $E$

## Гравітаційна сепарація

---

Optimize Response

Goal: maximize E

Optimum value = 96,6437

Factor	Low	High	Optimum
x1	-2,37841	2,37841	0,134976
x2	-2,37841	2,37841	0,148195
x3	-2,37841	2,37841	-0,230456
x4	-2,37841	2,37841	0,0462838
x5	-2,37841	2,37841	-0,261807

Рис. 6. Координаты экстремума-максимума функции отклика  $E$

### Выводы

Реализация контрольного эксперимента с указанными оптимальными значениями факторов дает значение функции отклика  $E = 96,05\%$ . Близость экспериментального и расчетного значений экстремума-максимума функции отклика  $E$  является еще одним подтверждением адекватности полученной регрессионной модели.

Решение конструктивной схемы механотронной системы вибрационного концентрационного стола позволяет получить координаты перемещения, значения скоростей и ускорений любой точки деки. Это дает возможность реализации управления кинетическим и динамическим режимами работы подвижного рабочего органа.

Результаты исследований позволяют сформулировать техническое и конструктивное задание для проектирования и создания типоразмерного ряда концентрационных столов с бигармоническим режимом для обогащения в труднообогатимых мелкодисперсных материалов в потоке жидкости на наклонной поверхности.

### Список литературы

1. Исаев И.Н. Концентрационные столы: Монография. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 100 с.
2. Корчевский А.Н. Исследование параметров перемещения наклонной подвижной поверхности, используемой для сепарации материалов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 54(95). – С. 69-77.
3. Simulation of the Coal and Rock Particle Interaction Kinetics During the Dry Separation / O.I. Nazymko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky et al. // Proceedings of XVI ICCP. – USA, 2010. – P. 581-586.
4. Simulation of coal separation and dehydration processes / A.N. Corchevsky, O.I. Nazymko, Y.A. Rozanov, et al. // Proceedings of XVII ICCP. – Turkey, 2013. – P. 695-700.
5. Математическое моделирование процессов обогащения полезных ископаемых: Монография / В.Н. Павлыш, Е.И. Назимко, А.Н. Корчевский и др.; под общ. ред. проф. Павлыш В.Н. и проф. Назимко Е.И. – Донецк: "ВИК", 2014. – 463 с.

6. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 152 с.
7. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах. – СПб: Питер, 1997. – 240 с.

© Корчевский А.Н., Гордеев Г.Г., 2016

*Надійшла до редколегії 01.03.2016 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*