

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-23-31

УДК 621.764:621.928.6

### РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЯ НА ВИБРАЦИОННОМ ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ

### DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A REGRESSION MODEL OF THE PROCESS OF COAL PREPARATION ON A VIBRATING PNEUMATIC SEPARATOR

**Корчевский Александр Николаевич<sup>1</sup>,**

кандидат техн. наук, заведующий кафедрой ОПИ, доцент,  
e-mail: korchevskyial@mail.ru

**Oleksandr N. Korchevskiy<sup>1</sup>,** C.Sc. Engineering,  
Head of Department, Ass. Professor, DonNTU.

**Удовицкий Владимир Иванович<sup>2</sup>,**

доктор техн. наук, зав. кафедрой ОПИ, профессор,  
e-mail: uvi@kuzstu.ru

**Vladimir I. Udovitsky<sup>2</sup>,** D.Sc. Engineering,  
Head of Department, Professor, KuzSTU.

**Сергеев Павел Всеволодович<sup>3</sup>,**

научный консультант, доктор техн. наук, e-mail: pavelopi55@gmail.com

**Pavel V. Sergeev<sup>3</sup>,** Dr. Sc.in Engineering, Scientific consultant.

**Холодов Кирилл Анатольевич<sup>4</sup>,**

региональный директор, ООО «ПрофЛайн»,

**Kirill A. Kholodov<sup>4</sup>,**

Regional Director, Proflin LLC.

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, Донецкая Народная Республика, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk People's Republic, 283001, Donetsk, Artema st., 58

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>3</sup>283122, ООО «Ресурс-Инжиниринг-Донбасс», г. Донецк, ул. Куйбышева, д.229, кв.10

<sup>3</sup>283122, LLC «Resource-Engineering-Donbass», Donetsk, Kuibysheva st., 229/10

<sup>4</sup>410038, Саратовская обл., г. Саратов, ул. Симбирская, дом 154А, оф. 53/2

<sup>4</sup>410038, Saratov region, Saratov city, Simbirskay street, house number 154A, of. 53/2

#### **Аннотация:**

*Методом планирования эксперимента разработана и проанализирована регрессионная модель процесса обогащения углей из породных отвалов Донбасса на вибрационном пневматическом сепараторе типа СВП-5,5×1. Исследовано влияние на процесс пяти факторов: удельного расхода воздуха; размаха колебаний деки сепаратора; нагрузки по питанию; продольного и поперечного углов наклона деки сепаратора. Установлено, что наиболее значимым является фактор «удельный расход воздуха», наименее – поперечный угол наклона деки. Прослеживается четкая экстремальная зависимость*

эффективности процесса разделения от всех исследуемых параметров. Это позволило решить задачу оптимизации процесса обогащения угля из породных отвалов на вибрационном пневматическом сепараторе – определены координаты экстремума-максимума целевой функции (эффективности разделения по Ханкоку-Луикену) в факторном пространстве. Проведенные исследования позволили оценить области рациональных значений режимных параметров процесса разделения, что, в свою очередь, дает возможность эффективного применения вибрационных пневматических сепараторов в практике углепереработки.

**Ключевые слова:** вибрационный пневматический сепаратор, обогащение угля, породные отвалы, планирование эксперимента, регрессионная модель.

**Abstract:**

The regression model of the process of coal preparation from waste dumps of Donbas on a vibration pneumatic separator of the SVP-5.5×1 type has been developed and analyzed by the method of experimental design. The influence of five factors on the process has been investigated: specific air consumption; the range of vibrations of the separator deck; power loads; longitudinal and transverse angles of inclination of the separator deck. It was found that the most significant factor is "specific air consumption", the least - the transverse angle of inclination of the deck. There is a clear extreme dependence of the efficiency of the separation process on all the studied parameters. This made it possible to solve the problem of optimizing the process of coal preparation from waste dumps on a vibrating pneumatic separator - the coordinates of the extremum-maximum of the objective function (separation efficiency according to Hanokoku-Luiken) in the factor space were determined. The conducted studies made it possible to assess the range of rational values of the operating parameters of the separation process. This, in turn, makes it possible to effectively use vibrating pneumatic separators in the practice of coal processing.

**Key words:** vibrating pneumatic separator, coal preparation, waste dumps, experimental design, regression model..

Применение сухих методов обогащения углей на базе пневматических сепараторов различного производства получает все более широкое применение в практике углепереработки. Сухой метод обогащения может широко применяться при предварительной переработке горной массы шахт для снижения зольности рядового угля и количества перевозимой пустой породы, а также при вторичной стадии утилизации породугольных отвалов, что является особенно актуальным в современных условиях [1-4].

Использование

вибрационных

пневматических сепараторов позволяет создавать малогабаритные, компактные и мобильные обогатительные комплексы с круглогодичным циклом работы. При этом имеется возможность регулирования основных параметров процесса обогащения и автоматизированного управления. Положительным фактором является независимость от водных ресурсов и сооружений для складирования высоковлажных продуктов [5-8].

По нашему мнению, перспективным направлением в сухом углеобогащении является применение вибропневматического сепаратора

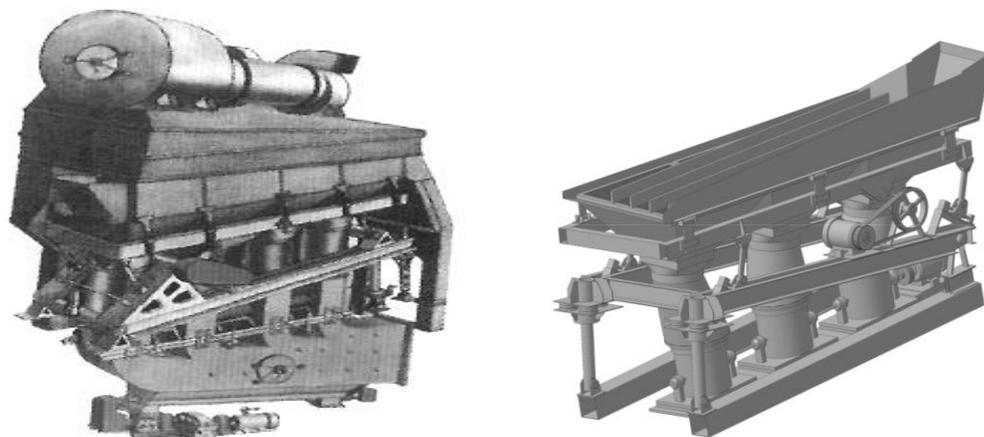


Рис. 1. Сепаратор СВП-5,5×1:1 – Общий вид; 2 – дека стола.

Fig. 1 Separator SVP-5,5 × 1:1 – General view; 2 – Table deck.

Таблица 1. Область факторного планирования  
 Table 1. Factorial planning area

Параметр	Обозначение	Код	Ед. измерения	Шаг	Уровни		
					-1	0	+1
Удельный расход воздуха	$q_v$	$X_1$	$\text{м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$	50	150	200	250
Размах колебаний	A	$X_2$	мм	4	7	11	15
Нагрузка на сепаратор	Q	$X_3$	т/ч	5	5	50	55
Продольный угол наклона сепаратора	$\alpha$	$X_4$	град.	2	2	4	6
Поперечный угол наклона сепаратора	$\beta$	$X_5$	град.	3	3	6	9

СВП-5,5х1 (рис.1) производства Луганского машиностроительного завода им. А.Я. Пархоменко [9]. Конструкция сепаратора СВП-5,5х1 основана на принципе пульсирующей подачи технологического воздуха под перфорированную деку. Бигармонический режим колебаний позволяет получать высокие технологические показатели и может применяться для выделения товарного продукта из углесодержащего сырья с широким диапазоном крупности и зольности [9-11]. Эффективность использования этих аппаратов во многом определяется их конструктивными особенностями, а также свойствами обогащаемого материала. В связи с этим разработка рациональных основ применения пневмосепараторов СВП-5,5х1 в практике углеобогащения является актуальной научно-технической задачей.

Целью данной работы является изучение закономерностей вибропневматической сепарации на основе разработки и анализа регрессионной модели процесса обогащения углей из породных отвалов Донбасса.

Исследования процесса обогащения на пневматическом сепараторе СВП-5,5х1 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 [12].

Объектом исследований являлись породные отвалы углей марки К крупностью 0-80 мм, зольностью 72% и влажностью 11,5% шахты «Щегловка-Глубокая». Следует отметить, что сепаратор СВП-5,5х1 обеспечивает после вторичной утилизации породы получение концентрата зольностью около 26%, что зачастую отвечает средней зольности рядовых углей шахт Донбасса.

Функция отклика – эффективность процесса обогащения по Ханкоку-Луйкену  $E$ , % [10]. Исследовалось влияние на процесс обогащения пяти основных факторов, избранных на основании априорных данных [3,4]: удельного расхода воздуха ( $X_1$ ); размаха колебаний ( $X_2$ ); нагрузки на

сепаратор по питанию ( $X_3$ ); продольного угла наклона сепаратора ( $X_4$ ); поперечного угла наклона сепаратора ( $X_5$ ). Выбранные факторы удовлетворяют требованиям управляемости, взаимнезависимости, 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.

Обработка результатов экспериментов выполнена с помощью модуля «Планирование эксперимента» статистического пакета Statgraphics Centurion [13-15]. Матрица планирования, экспериментальные и расчетные значения функции отклика  $E$  в точках плана представлены в табл. 2.

Остановимся на анализе полученных результатов. На парето- графике (рис. 2) знаком «плюс» отмечены факторы и их взаимодействия, рост которых сопровождается увеличением функции отклика и знаком «минус» те из них, которые приводят к уменьшению  $E$ . Вертикальная линия на графике отвечает 95% значимости коэффициентов модели. Столбчатые диаграммы, уходящие правее отмеченной линии, свидетельствуют о статистической значимости соответствующих им коэффициентов модели.

Как видно из парето-графика (рис.2), 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  $X_1X_3$ ,  $X_2X_3$ ,  $X_2X_4$ ,  $X_3X_4$ ,  $X_3X_5$  и  $X_4X_5$ . С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет вид:

$$E = 95,1898 + 3,01778X_1 - 1,75509X_2 - 0,431362X_3 + 0,613566X_4 - 0,471547X_5 - 6,26611X_1^2 - 0,490625X_1X_2 + 0,609375X_1X_4 - 0,496875X_1X_5 -$$

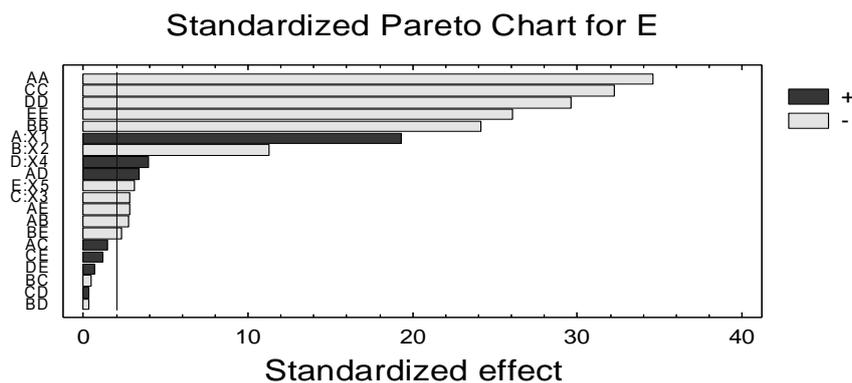


Рис. 2. Парето- график коэффициентов модели  
 Fig. 2. Pareto graph of model coefficients.

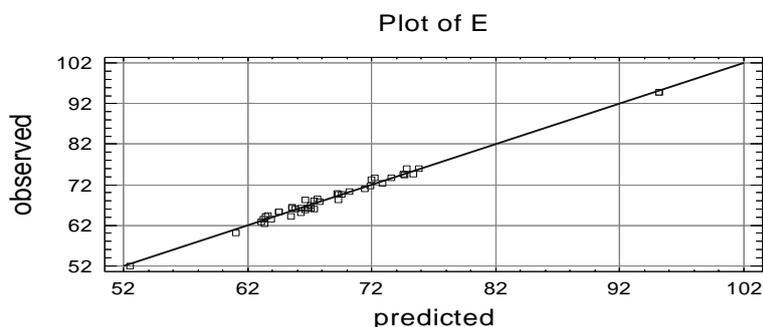


Рис. 3. График сравнения расчетных (predicted) и экспериментальных (observed) данных.  
 Fig. 3. Comparison graph of predicted and observed data

$$4,37459X_2^2 - 0,415625X_2X_5 - 5,85068X_3^2 - 5,36454X_4^2 - 4,72814X_5^2$$

Адекватность регрессионной модели подтверждается высоким значением коэффициента детерминации  $R^2 = 98,94 \%$  и показателя “потери согласия функции (Lack-of-fit)”  $P = 0,1040$  (что больше критического значения;  $P_k = 0,05$ ) [13, 16].

Адекватность математической модели по критерию Фишера и оптимальная область проведения эксперимента, для которой значения факторов определены методом Бокса-Уилсона, подтверждены также программным комплексом [17, 18].

На рис. 3 показана взаимосвязь полученных (observed) и расчетных (predicted) данных. Как видно из рис. 2, различие между экспериментальными и расчетными значениями функции отклика минимальное – большинство экспериментальных точек находится в окрестности прямой. Это также подтверждает адекватность полученной модели изучаемому процессу.

На рис. 4 представлены трехмерные сечения (поверхности) многомерной функции отклика, а также контурные кривые этих поверхностей как линии проекций равных значений E на плоскость. При этом значения других факторов принимались на нулевом уровне.

Как видно из уравнения регрессии и парето-

графика (рис. 2), наиболее значимым среди исследованных является фактор  $X_1$  «удельный расход воздуха». Под воздействием подаваемого воздуха угольная постель в межрифельном пространстве разрыхляется, приобретает «текущее» состояние. Расход и напор воздуха подбираются таким образом, чтобы под воздействием воздушных струй, пронизывающих угольную постель, более легкие угольные зерна из нижних слоев постели поднимались вверх, а более тяжелые – породные зерна опускались вниз на рашпильные сита. В результате угольная постель разделяется на три слоя. Вверху концентрируются наиболее легкие угольные зерна, внизу образуется тяжелый породный слой, а между ними располагаются промежуточные по плотности промпродуктовые зерна. Тем самым создаются необходимые предпосылки для веерного распределения материала на деке сепаратора и выделения легких, промпродуктовых и тяжелых фракций в отдельные продукты вдоль борта сепаратора в поперечном направлении.

Расход воздуха на сепараторе устанавливается исходя из задачи получения продуктов соответствующего качества. При заниженном его расходе получаемый концентрат характеризуется высоким содержанием минеральных примесей в крупных классах. С

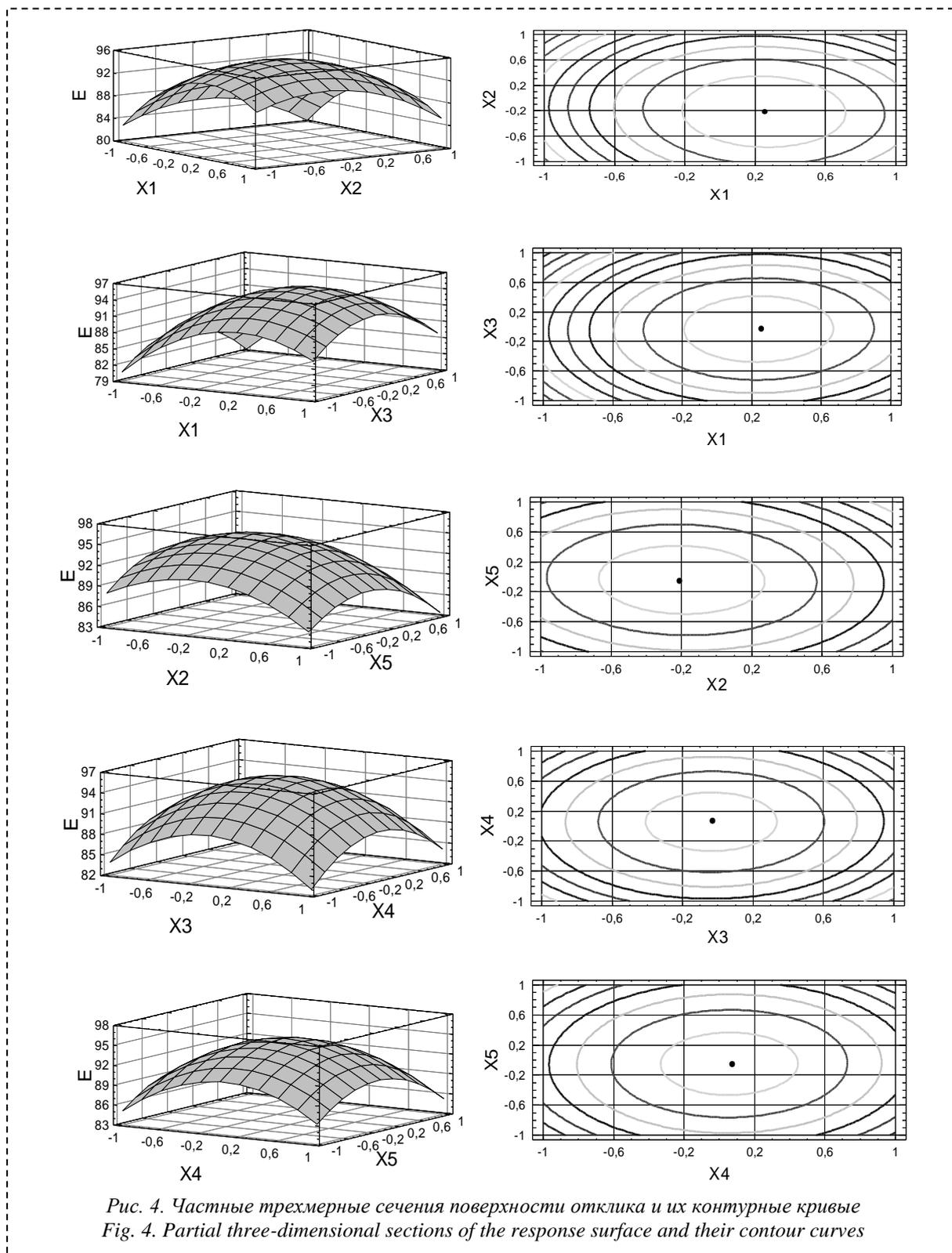
Таблица 2. Матрица планирования и результаты экспериментов.  
 ( $E_{\text{экс}}$  – экспериментальное значение функции отклика ;  $E_{\text{рас}}$  – расчетное)  
 Table 2. Planning matrix and experimental results.  
 ( $E_{\text{ex}}$  – experimental value of the response function;  $E_{\text{cal}}$  – calculated)

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$E_{\text{экс}}$	$E_{\text{рас}}$
1	-1	-1	-1	-1	-1	68	67,3262
2	1	-1	-1	-1	-1	73,8	73,6117
3	-1	1	-1	-1	-1	66,1	65,8785
4	1	1	-1	-1	-1	70,2	70,2016
5	-1	-1	1	-1	-1	66,2	65,6135
6	1	-1	1	-1	-1	72,3	72,9115
7	-1	1	1	-1	-1	63,6	63,8533
8	1	1	1	-1	-1	69,9	69,1889
9	-1	-1	-1	1	-1	66,3	67,1158
10	1	-1	-1	1	-1	75,9	75,8389
11	-1	1	-1	1	-1	64,2	65,4806
12	1	1	-1	1	-1	73,8	72,2412
13	-1	-1	1	1	-1	66,5	65,5906
14	1	-1	1	1	-1	74,7	75,3262
15	-1	1	1	1	-1	64,5	63,6429
16	1	1	1	1	-1	71,1	71,4160
17	-1	-1	-1	-1	1	68,4	67,5831
18	1	-1	-1	-1	1	71,7	71,8812
19	-1	1	-1	-1	1	65,3	64,4729
20	1	1	-1	-1	1	66,2	66,8085
21	-1	-1	1	-1	1	65,7	66,6829
22	1	-1	1	-1	1	73,2	71,9934
23	-1	1	1	-1	1	63,6	63,2602
24	1	1	1	-1	1	68,2	66,6083
25	-1	-1	-1	1	1	67,8	67,8102
26	1	-1	-1	1	1	74,6	74,5458
27	-1	1	-1	1	1	65,4	64,5125
28	1	1	-1	1	1	69,6	69,2856
29	-1	-1	1	1	1	67	67,0975
30	1	-1	1	1	1	75,9	74,8456
31	-1	1	1	1	1	64,1	63,4873
32	1	1	1	1	1	68,3	69,2729
33	-2,37841	0	0	0	0	52	52,5660
34	2,37841	0	0	0	0	66,3	66,921
35	0	-2,37841	0	0	0	74,5	74,6178
36	0	2,37841	0	0	0	65,2	66,2692
37	0	0	-2,37841	0	0	62,8	63,1195
38	0	0	2,37841	0	0	60,2	61,0676
39	0	0	0	-2,37841	0	62,3	63,3842
40	0	0	0	2,37841	0	66,2	66,3028
41	0	0	0	0	-2,37841	69,6	69,5651
42	0	0	0	0	2,37841	66,1	67,322
43	0	0	0	0	0	94,7	95,1898
44	0	0	0	0	0	94,9	95,1898

увеличением подачи воздуха их содержание падает и может быть доведено до значений, обычно укладываемых в существующие нормы (2,0-2,5%) даже в случае получения сортовых концентратов. Из рис. 2 и 4 вытекает, что с увеличением  $X_1$  наблюдается рост эффективности процесса разделения на пневматическом

сепараторе.

Вторым по значимости является фактор  $X_2$  «Размах колебаний». Размах колебаний деки на отдельных ее участках определяется эксцентриситетом приводного вала и параметрами кинематической схемы при установленном положении опор сепаратора. С увеличением

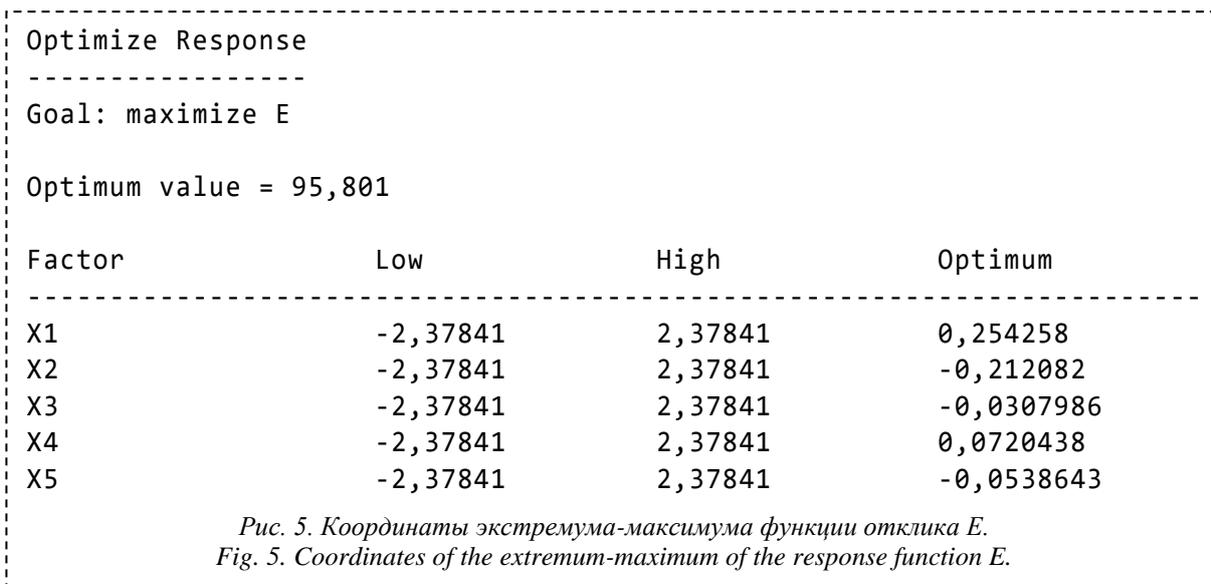


эксцентриситета и, соответственно, размаха колебаний деки повышаются разрыхленность постели, особенно для нижних слоев, а также скорость ее продвижения вдоль деки.

Оптимальное значение размаха колебаний деки во многом зависит от крупности исходного питания стола. Обычно большая амплитуда и размах колебаний лучше для крупного питания, и

наоборот – для тонких частиц. Однако, как видно из рис. 2 и 4, чрезмерный рост  $X_2$  сопровождается уменьшением величины  $E$  вследствие снижения точности разделения фракций.

Рост третьего по значимости фактора  $X_4$  «Продольный угол наклона сепаратора» приводит к увеличению функции отклика  $E$ . Действительно, при хорошем разрыхлении постели материала



лучшие результаты при обогащении угля крупных классов обычно достигаются при продольном наклоне рабочей поверхности к горизонту около 6°. Если разрыхление недостаточное и разница в скоростях движения вдоль деки верхних и нижних слоев не обеспечивает требуемой точности разделения материала, то продольный наклон к горизонту обычно увеличивается (до 8° и выше).

Наименее значимыми являются факторы X<sub>3</sub> «нагрузка на сепаратор» и X<sub>5</sub> «поперечный угол наклона сепаратора». Увеличение каждого из них приводит к уменьшению значений E. Рост нагрузки на

сепаратор (фактор X<sub>3</sub>) свыше некоторого критического значения приводит к снижению точности разделения за счет взаимозасорения легких и тяжелых фракций материала.

Кроме того, чем больше поперечный наклон деки (фактор X<sub>5</sub>), тем выше скорость перемещения верхних слоев постели материала в поперечном направлении. При этом выше засорение разгружаемых через бортовые рифли концентраторов и промпродуктов тяжелыми фракциями. Все это обуславливает снижение значения целевой функции E.

Как видно из рис. 4, прослеживается четкая экстремальная зависимость функции отклика E от исследуемых параметров. Это позволяет решать задачу оптимизации процесса обогащения на пневматическом сепараторе.

Положение экстремума-максимума функции отклика E показано в виде точек на контурных кривых (рис.4). Координаты экстремума-максимума E показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, расчетное максимальное значение функции отклика E = 95,80%. При этом оптимальные значения факторов составляют : X<sub>1</sub> = 0,254258; X<sub>2</sub> = - 0,212082; X<sub>3</sub> = -0,0307986; X<sub>4</sub> = 0,0720438; X<sub>5</sub> = -0,0538643.

В пересчете на натуральные значения факторов имеем: x<sub>1</sub> = 213 м<sup>3</sup>/ч·м<sup>2</sup>; x<sub>2</sub> = 10,2 мм; x<sub>3</sub> = 49,8 т/ч; x<sub>4</sub> = 4,14 град.; x<sub>5</sub> = 5,84 град.

Реализация контрольного эксперимента с указанными оптимальными значениями факторов дает значение функции отклика E = 95,45%. Близость экспериментального и расчетного значений экстремума-максимума функции отклика E является еще одним подтверждением адекватности полученной регрессионной модели.

#### Выводы

1. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс обогащения углей из породных отвалов Донбасса на вибрационном пневматическом сепараторе типа СВП-5,5×1.

2. Определены характер и степень влияния на процесс разделения на столе основных технологических параметров: удельного расхода воздуха; размаха колебаний деки сепаратора; нагрузки по питанию; продольного и поперечного углов наклона деки. Установлено, что наиболее значимым есть фактор «удельный расход воздуха», наименее – поперечный угол наклона деки.

3. В связи с экстремальным характером зависимости эффективности разделения от исследуемых факторов решена задача по оптимизации процесса обогащения углей из породных отвалов на вибрационном пневматическом сепараторе типа СВП-5,5×1.

4. Проведенные исследования позволили оценить области рациональных значений режимных параметров процесса обогащения, что, в свою очередь, дает возможность эффективного применения вибрационных пневматических сепараторов в практике углепереработки.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку математической модели движения рабочего органа сепаратора СВП-5,5×1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли Г.М. Методы сухого обогащения угля: практика применения / Г.М. Ли, В.А. Груздев, В.И. Аникин // Уголь. – 2008. - № 9. – С. 58-61.
2. Новая технология сухого обогащения // Российский уголь. – 2003. – №1. – С. 28-29.
3. Анохин В.Д. Вибрационные сепараторы / В.Д. Анохин, Д.А. Плинс, В.Н. Монахов.- М.: Недра, 1991. – 156 с.
4. Li Congmin. Compound Dry Cleaning Technique – Study and Practice. / Congmin Li // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. China. 2006. p. 439-447.
- 5.Caner Orhan E., Levent Erqun, Altiparmak B., Application of the FGX Separator in the Enrichment of Cafalagzi Coal Preparation Congress Proceedings. Society for Mining, Metallurgy Exploration. – 2010. – S. 562-570.
6. Lianxing Sun. Application of FGX compound dry coal cleaning machine for PIC / Sun Lianxing // China Coal. – 2006. - № 1. – S. 115-116.
7. Кофанов А.С. Обогащение полезных ископаемых пневмовибрационным способом / А.С. Кофанов, В.Ф. Чумак, А.С. Уманец, Ю.И. Ефремов// Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. зб., Днепропетровск – Вып. 17. – 2003. – С. 96-101.
8. Кофанов А.С. Пневмовибрационный способ обогащения угля / А.С.Кофанов, В.Ф. Чумак, Ю.И. Ефремов // Уголь Украины. – 2006. - № 4. – С.42-45.
9. Е.Е. Гарковенко и др. Применение вибрационных пневматических сепараторов всерного типа при обогащении углей / Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Корчевский А.Н., Гарин Ю.М., Пархоменко А.В. / Обогащение полезных ископаемых: Научн.-техн. зб., Днепропетровск– 2011. - Вып. 45(86). - С. 66-70.
- 10.Корчевский А.Н. Опыт применения процессов и аппаратов вибрационного пневматического обогащения сырьевых ресурсов. / Монография // Корчевский А.Н. – Донецк: « Східний видавничий дім», 2015. – 233 с.
11. Полулях А.Д. Определение коэффициентов взаимозасорения продуктов обогащения угля на пневматических сепараторах / А.Д. Полулях // Уголь Украины. – 2012. - № 3. – С. 44-45.
12. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента.- М.: Металлургия, 1981- 152 с.
13. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах.- Спб: Питер, 1997 .- 240 с.
14. Пен Р.З. Планирование эксперимента в STATGRAPHICS CENTURION // Международный журнал экспериментального образования- 2015, - №10-2- С.160-162.
15. Берестнева О.Г. Прикладная математическая статистика: учебное пособие/ О.Г.Берестнева, О.В. Марухина, Г.Е. Шевелев.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.- 188 с.
16. Сергеев П.В., Білецький В.С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум)- Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016.- 119 с.
17. Кандинский В.А. Программное обеспечение планирования эксперимента // Проблемы геологии и освоения недр : труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Том 2 / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 610-612. ISBN 978-5-4387-0691-5 (т. 2).
18. Кандинский В.А., Удовицкий В.И. Планирование факторного эксперимента и опытов крутого восхождения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611796. Заявка № 2015662600. Дата поступления 21 декабря 2015 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 10 февраля 2016.

## REFERENCES

1. Li G.M., Gruzdev V.A., Anikin V.I. methods of dry enrichment of coal: practice of application. 2008, No. 9, pp. 58-61.
2. New technology of dry enrichment // Russian coal. 2003, No. 1, pp. 28-29.

3. Anokhin V.D., Plins D.A., Monakhov V.N. vibrational separators. Moscow: Nedra publ., 1991, 156 P.
4. Li Congmin. Compound Dry Cleaning Technique – Study and Practice. / Sopdmin Li // Proceedings of the XV International Congress of Coal Preparation. China. 2006. p. 439-447.
5. Caner Orhan E., Levent Erqun, Altiparmak B., Application of the FGX Separator in the Enrichment of Cafalagzi Coal Preparation Congress Proceedings. Society for Mining, Metallurgy Exploration. – 2010. – S. 562-570.
6. Lianxing Sun. Application of FGX compound dry coal cleaning machine for PIC / Sun Lianxing // China Coal. – 2006. – № 1. – S. 115-116.
7. Kofanov A.S., Chumak V.F., Umanets A.S., Efremov Yu.I. enrichment of useful excavated by a pneumatic vibration method.- technical collection. Dnepropetrovsk-Issue 17. – 2003. – Pp. 96-101.
8. Kofanov A.S., Chumak V.F., Efremov Yu.I. Pneumovibration method of coal preparation. Coal of Ukraine .-2006, No. 4, pp. 42-45.
9. E.E. Garkovenko et al. Garkovenko E.E., Nazimko E.I., Korchevsky A.N., Garin Yu.M., Parkhomenko A.V. application of vibration pneumatic separators of the fan type in the enrichment of coals / enrichment of useful excavated: Nauchn. – technical collection., Dnepropetrovsk-2011. - Issue 45(86). – P.66-70.
10. Korchevsky A.N. experience in the application of processes and devices of vibration pneumatic enrichment of raw materials. / Monograph // Korchevsky A.N. –Donetsk: «Vostochny publishing house», 2015. – 233 P.
11. Polulyakh A.D. determination of the coefficients of mutual contamination of coal processing products on pneumatic separators / A.D. Polulyakh // Coal of Ukraine. 2012, No. 3, pp. 44-45.
12. Nalimov V.V., Golikova T.I. Logical Foundations of experiment planning. Moscow: Metallurg publ., 1981, 152 P.
13. Duke V. Data Processing on a PC in examples. St. Petersburg: St. Petersburg, 1997. – 240 P.
14. Pen R.Z. planning a experiment in STATGRAPHICS CENTURION // International Journal of Experimental Education - 2015, no. 10-2, pp. 160-162.
15. Berestneva O.G., Marukhina O.V., Shevelev G.E. Applied Mathematical Statistics: a textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012. 188 P.
16. Sergeev P.V., Beletsky V.S. computer modeling of technological processes of mineral processing (practicum) - Mariupol: Vostochny publishing house, 2016. – 119 P.
17. Kandinsky V.A. Planning software for experiment // Problems of geology and mineral resources development: proceedings of the XX International M.A. Ussov Symposium for students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of the Tomsk Polytechnic University. Volume 2 / Tomsk Polytechnic University. - Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2016. C. 610-612. ISBN 978-5-4387-0691-5 (Volume 2).
18. Kandinsky V.A., Udovitsky V.I. Planning of Factor Experiment and Experiments of Climbing. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2016611796. Application No. 2015662600. Date of entry is December 21, 2015. Date of state registration in the Register of computer programs February 10, 2016.

Поступило в редакцию 16.02.2021

Received 16 February 2021