

УДК 622.7

*к.т.н. Науменко В. Г.*  
(ДонГТУ, г. Донецк, ДНР, [andiline.mail@gmail.com](mailto:andiline.mail@gmail.com))

## ОБОГАЩЕНИЕ АНТРАЦИТОВЫХ ШЛАМОВ ЛАТЕКСНЫМИ ФЛОКУЛЯНТАМИ

*Методом планирования эксперимента разработана и проанализирована регрессионная модель процесса селективной флокуляции антрацитовых шламов бутадиен-стирольным латексом БС-30Ф. Установлено, что зависимость извлечения угольных фракций в концентрат E от расхода флокулянта носит экспоненциальный характер, а характер зависимостей извлечения E от интенсивности и времени перемешивания суспензии — экстремальный. В целом антрациты требуют более высоких расходов флокулянта и более интенсивного турбулентного перемешивания на стадии флокуляции, чем каменные угли.*

**Ключевые слова:** антрацитовые шламы, синтетические латексы, селективная флокуляция, планирование эксперимента, регрессионная модель.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Серьезным недостатком традиционной технологии обогащения угольных шламов — пенной флотации — является низкая селективность разделения частиц крупностью менее 50–60 мкм. Их повышенная концентрация в исходном питании приводит к ухудшению флотации как более крупных, так и тонких частиц и как следствие — к значительным потерям органической массы углей с флотоотходами.

Одним из наиболее эффективных путей повышения селективности разделения угольных шламов является внедрение технологии флокуляционно-флотационного обогащения с применением в качестве селективного флокулянта синтетических латексов [1]. Технология прошла широкую лабораторную, а также опытно-промышленную апробацию на ряде углеобогатительных фабрик Донбасса [1, 2]. Однако эти исследования проводились в основном на различных марках каменных коксующихся углей — Г, Ж, К и ОС. В то же время проблема глубокого обогащения тонких классов энергетических углей и антрацитов стоит не менее остро, чем коксующихся. Внедрение технологии флокуляционно-флотационного обогащения на антрацитовых шламах позволит существенно снизить зольность топлива, а также расширить сырьевую базу современной теплоэнергетики.

**Целью** данной работы является изучение закономерностей процесса селективной флокуляции антрацитовых шламов синтетическими латексами.

**Объект исследования** — технология обогащения угольных шламов.

**Предмет исследования** — закономерности селективной флокуляции антрацитовых шламов латексным флокулянтном БС-30Ф.

**Задачи** исследования:

- разработка регрессионной модели процесса селективной флокуляции антрацита флокулянтном БС-30Ф;
- определение характера и степени влияния на процесс селективной флокуляции исследуемых параметров.

**Методика исследования.** Флокуляционно-флотационный способ обогащения углей и антрацитов — сложный, многоступенчатый процесс, эффективность которого зависит от целого ряда технологических факторов. Исследования показывают, что наиболее существенными из них являются расход флокулянта ( $q_n$ ), время ( $\tau_{фл}$ ) и интенсивность турбулентного перемешивания ( $Re$  или  $n_{фл}$ ) на стадии флокуляции. Для оценки характера и степени влияния на процесс указанных параметров было принято решение о разработке статистической модели в виде уравнения регрессии, полученной по результатам активного многофакторного эксперимента.

При разработке регрессионной модели процесса был реализован центральный композиционный рототабельный план (ЦКРП) для трех факторов. Подобные планы обладают высокими статистическими характеристиками оптимальности и обеспечивают одинаковую точность модели во всех направлениях гиперпространства при минимальном количестве опытов [3]. Априорная информация показала, что линейные модели неадекватны процессу флокуляции, поэтому была поставлена задача разработки модели второго порядка в виде полного квадратичного полинома

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k A_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k A_{ii} X_i^2,$$

где  $Y$  — целевая функция;  $A_i$ ,  $A_{ij}$ ,  $A_{ii}$  — расчетные коэффициенты модели;  $k$  — число факторов.

Объектом флокуляции являлись антрацитовые шламовые воды ЦОФ «Комендантская» с содержанием твердого  $150 \text{ кг/м}^3$  и зольностью твердой фазы 32 %. В качестве флокулянта применялся латекс БС-30Ф производства Воронежского завода синтетических каучуков. Для повышения точности дозировки латекс разбавлялся водой в соотношении 1:100. После разведения водой рабочая концентрация флокулянта составляла 0,5 % основного вещества, латекс обладал достаточной агрегативной устойчивостью, о чем свидетельствовало полное отсутствие коагулюма.

Селективная флокуляция шлама осуществлялась в смесителе емкостью  $750 \text{ см}^3$ , оборудованном импеллерной мешалкой с регулируемым приводом. Режим флокуляции ( $q_{\text{л}}$ ,  $\tau_{\text{фл}}$ , и  $n_{\text{фл}}$ ) задавался в соответствии с планом эксперимента. Отделение сфлокулированного продукта от минерализованной суспензии проводилось в камере лабораторной флотомашини типа ФЛ-1 с объемом камеры  $750 \text{ см}^3$ . Режим флотационного разделения во всех экспериментах был постоянным: расход реагента-собирателя (керосина) —  $2000 \text{ г/т}$

шлама; расход реагента-вспенивателя («Оксаль») —  $150 \text{ г/т}$  шлама; время кондиционирования пульпы с реагентами —  $30 \text{ с}$ ; частота вращения импеллера —  $1750 \text{ мин}^{-1}$ ; удельный расход воздуха —  $2 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$ ; время флотации —  $2 \text{ минуты}$ .

Продукты разделения — концентрат и отходы — обезвоживали, высушивали, взвешивали и определяли их зольность по стандартной методике. По полученным данным рассчитывали величину извлечения концентратных фракций в концентрат  $E$  по формуле

$$E = \frac{\gamma_k (100 - A_k^d)}{100 - A_u^d}, \%,$$

где  $\gamma_k$  — выход концентрата;  $A_k^d$  и  $A_u^d$  — зольность концентрата и исходного шлама соответственно. Величина  $E$  использовалась в данных исследованиях как целевая функция. Разработка и анализ плана осуществлялись с помощью модуля «Планирование эксперимента» программы Statgraphics 5.0 Plus.

Трехфакторный ЦКРП состоял из восьми опытов в ядре матрицы, шести звездных точек и шести опытов в центре плана. Величина звездного плеча  $\alpha = 1,682$ .

Факторы и уровни их варьирования приведены в таблице 1.

Матрица планирования, экспериментальные и расчетные значения извлечения  $E$  в точках плана приведены в таблице 2.

Проверка значимости коэффициентов модели осуществлялась с использованием Парето-карты (см. рис. 1). Вертикальная линия на графике отвечает 95%-ному доверительному интервалу. Как видно, статистически значимыми являются все коэффициенты модели, за исключением  $A_{13}$  и  $A_{23}$ , столбчатые диаграммы которых не достигают отмеченной вертикальной линии.

Высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 = 94,85 \%$ ) свидетельствует об адекватности полученной регрессионной модели изучаемому процессу. Адекватность модели также подтверждается тем фактом, что  $p$ -уровень теста Lack-of-fit (потери согласия модели), равный  $0,0674$ , превышает критическое значение ( $p_{\text{кр}} = 0,05$ ) [4, 5].

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

| Переменные                  | Код переменной | Единицы измерения | Интервал варьирования | Верхний уровень (+) | Основной уровень (0) | Нижний уровень (-)  |
|-----------------------------|----------------|-------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Расход латекса              | X <sub>1</sub> | г/т               | 100                   | 300                 | 200                  | 100                 |
| Интенсивность перемешивания | X <sub>2</sub> | Re                | 0,6·10 <sup>5</sup>   | 3,4·10 <sup>5</sup> | 2,8·10 <sup>5</sup>  | 2,2·10 <sup>5</sup> |
| Время флокуляции            | X <sub>3</sub> | с                 | 45                    | 135                 | 90                   | 45                  |

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментов

| № п/п | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | E <sub>эксп.</sub> , % | E <sub>расч.</sub> , % |
|-------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| 1     | -1             | -1             | -1             | 87,19                  | 87,62                  |
| 2     | 1              | -1             | -1             | 89,81                  | 89,83                  |
| 3     | -1             | 1              | -1             | 86,95                  | 86,58                  |
| 4     | 1              | 1              | -1             | 90,57                  | 90,23                  |
| 5     | -1             | -1             | 1              | 87,60                  | 87,87                  |
| 6     | 1              | -1             | 1              | 89,10                  | 89,39                  |
| 7     | -1             | 1              | 1              | 86,27                  | 86,18                  |
| 8     | 1              | 1              | 1              | 89,64                  | 89,14                  |
| 9     | -1,682         | 0              | 0              | 86,25                  | 86,07                  |
| 10    | 1,682          | 0              | 0              | 90,13                  | 90,41                  |
| 11    | 0              | -1,682         | 0              | 89,90                  | 89,26                  |
| 12    | 0              | 1,682          | 0              | 87,42                  | 88,16                  |
| 13    | 0              | 0              | -1,682         | 88,72                  | 88,84                  |
| 14    | 0              | 0              | 1,682          | 88,15                  | 88,13                  |
| 15    | 0              | 0              | 0              | 90,72                  | 90,47                  |
| 16    | 0              | 0              | 0              | 90,35                  | 90,47                  |
| 17    | 0              | 0              | 0              | 90,97                  | 90,47                  |
| 18    | 0              | 0              | 0              | 90,34                  | 90,47                  |
| 19    | 0              | 0              | 0              | 90,22                  | 90,47                  |
| 20    | 0              | 0              | 0              | 90,25                  | 90,47                  |

Standardized Pareto Chart for E

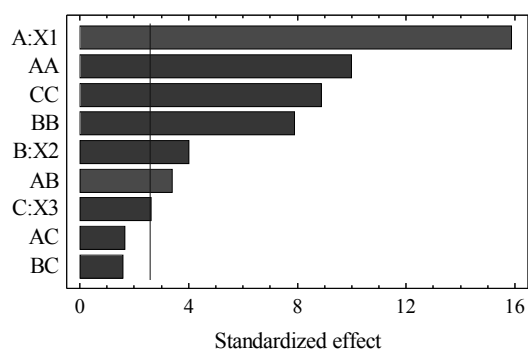


Рисунок 1 Парето-карта коэффициентов модели

С учетом статистической незначимости коэффициентов  $A_{13}$  и  $A_{23}$ , уравнение регрессии имеет следующий вид

$$E = 90,47 + 1,291X_1 - 0,325X_2 - 0,219X_3 + 0,359X_1X_2 - 0,789X_1^2 - 0,623X_2^2 - 0,703X_3^2.$$

На рисунке 2 представлены частные трехмерные сечения поверхности отклика, а также их контурные кривые.

Анализ полученных графиков показывает, что зависимость извлечения  $E$  от расхода флокулянта ( $X_1$ ) носит экспоненци-

альный характер, а характер зависимостей извлечения  $E$  от интенсивности ( $X_2$ ) и времени ( $X_3$ ) перемешивания суспензии — экстремальный.

Оптимизация полученного уравнения регрессии средствами того же программного модуля позволила определить координаты экстремума-максимума целевой функции в  $n$ -мерном пространстве:

– в кодированных значениях  $X_1 = 0,84$ ;  
 $X_2 = 0,016$ ;  $X_3 = -0,26$ ;

– в натуральном выражении  $q_{fl} = 285$  г/т;  
 $Re = 2,81 \cdot 10^5$ ;  $\tau_{fl} = 78$  с.

Точки на графиках контурных кривых (см. рис. 2) соответствуют оптимальным значениям исследуемых параметров.

Предсказанное значение целевой функции в точке экстремума составляет  $E = 91,04$  %. В результате реализации опыта в точке экстремума получен концентрат с извлечением концентратных фракций в концентрат  $E = 91,15$  %. Близость экспериментальных и расчетных значений целевой функции в точке экстремума является еще одним подтверждением адекватности полученного уравнения регрессии.

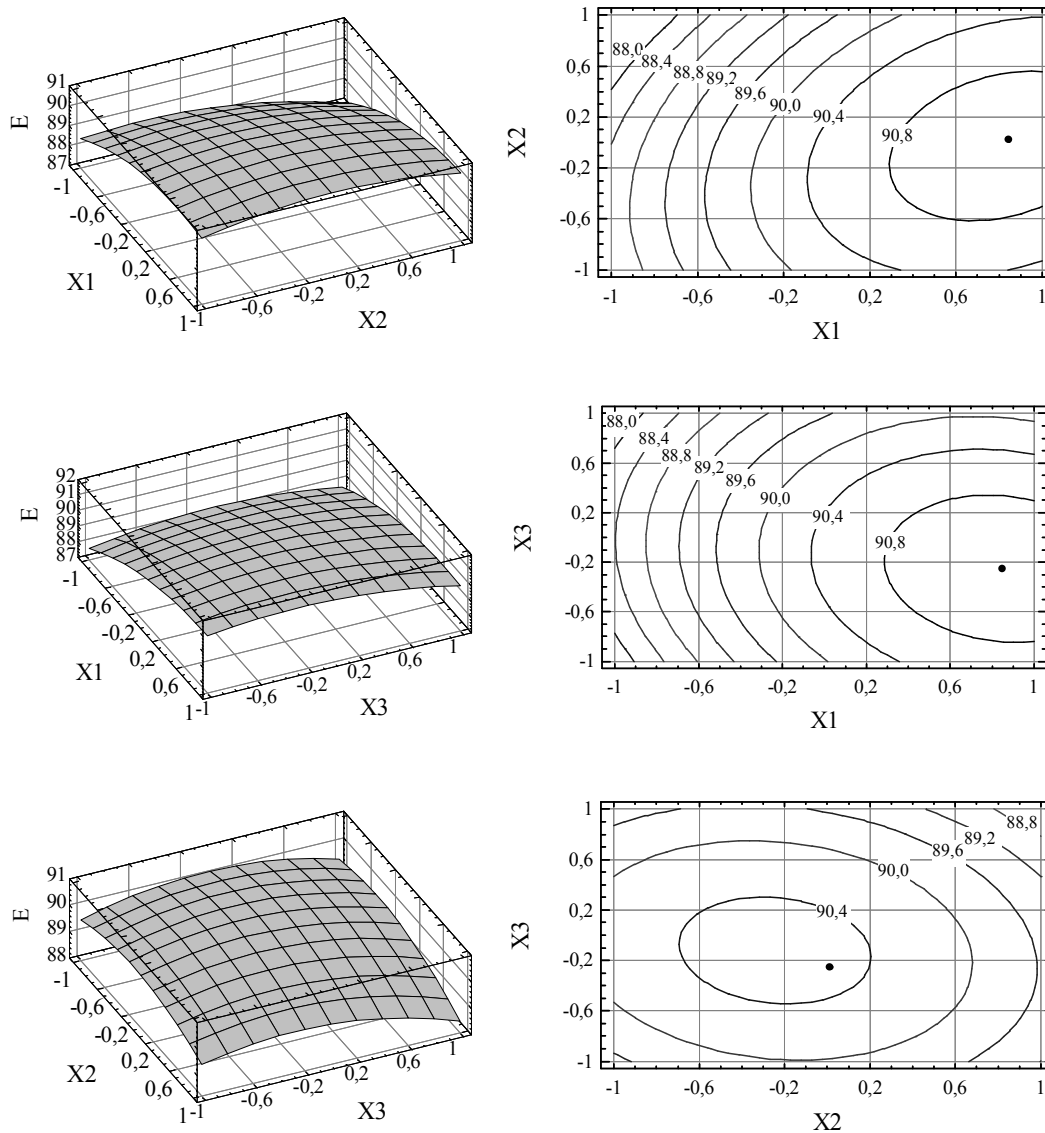


Рисунок 2 Частные трехмерные сечения поверхности отклика и их контурные кривые

**Выводы и направление дальнейших исследований:**

1. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс селективной флокуляции антрацитовых шламов синтетическим латексом.

2. В целом следует отметить, что антрациты требуют более высоких расходов флокулянта и более интенсивного турбулентного перемешивания на стадии флокуляции, чем каменные угли.

Проведенные исследования по определению характера и степени влияния на процесс флокуляции антрацитовых шламов основных технологических факторов позволили оценить области рациональных значений режимных параметров процесса, что, в свою очередь, дает возможность приступить к этапу опытно-промышленной апробации технологии на обогатительных фабриках Донбасса.

**Библиографический список**

1. Нікітін, І. М. Селективна флокуляція вугільних шламів латексами [Текст] / І. М. Нікітін, П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. — Донецьк : ДонДТУ, Східний видавничий дім, 2001. — 152 с.
2. Сергєєв, П. В. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами [Текст] : монографія / П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. — Донецьк : Східний видавничий дім, редакція гірничої енциклопедії, 2010. — 240 с.
3. Сергєєв, П. В. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин [Текст] : практикум / П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. — Маріуполь : Східний видавничий дім, 2016. — 119 с.
4. Дюк, В. Обработка данных на ПК в примерах [Текст] / В. Дюк. — СПб. : Питер, 1997. — 240 с.

© Науменко В. Г.

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

*Статья поступила в редакцию 02.03.20.*

**PhD in Engineering Naumenko V. G. (DonNTU, Donetsk, DPR, andiline.mail@gmail.com)**  
**ENRICHMENT OF ANTHRACITE SLURRIES WITH LATEX FLOCCULANTS**

*A regression model of selective flocculation of anthracite slurries with BS-30F butadiene-styrene latex was developed and analyzed using the experimental planning method. There has been determined that the dependence of extraction of coal fractions in the concentrate E from the flocculant consumption is of exponential nature, and the nature of the dependency extraction E from intensity and suspension mixing time is extreme. In general, anthracites require higher flocculant consumption and more intensive turbulent mixing at the flocculation stage than coal.*

**Key words:** *anthracite slurries, synthetic latexes, selective flocculation, experiment planning, regression model.*