

## ПРИМЕНЕНИЕ ФЛОКУЛЯНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ $\text{SiO}_2$

Е.Д. Чылбак-оол<sup>1,2</sup>, Ю.В. Конохов<sup>1</sup>, У.В. Дмитракова<sup>2</sup>, А.А. Николаев<sup>1</sup>, А.С. Сизова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru

<sup>2</sup> ООО «Научно-технический центр «Бакор», Москва, Россия

**Аннотация:** Рассмотрена проблема повышения эффективности фильтрования флотационных железорудных концентратов с низким содержанием кремнезема ( $\text{SiO}_2 \sim 2,4\%$ ) и высокой долей шламистых частиц ( $< 5 \text{ мкм}$ ), возникающей из-за необходимости глубокого обогащения для производства высококачественных окатышей прямого восстановления. Основная сложность заключается в высоком удельном сопротивлении осадка и остаточной влажности продукта при обезвоживании таких тонкодисперсных концентратов на керамических дисковых вакуум-фильтрах, широко применяемых в промышленности благодаря энергоэффективности. Целью исследования являлся поиск и оптимизация типа и дозировок флокулянтов для эффективного агрегирования мелких частиц с целью улучшения фильтрационных характеристик на керамических дисковых вакуум-фильтрах. Комплексно исследовано влияние типов флокулянтов на процесс фильтрации труднообезвоживаемых флотационных железорудных концентратов с низким содержанием  $\text{SiO}_2$  и высокой шламистостью. В качестве объектов исследования использованы: железорудный концентрат ( $69,7\% \text{ Fe}_{\text{общ}}, 2,4\% \text{ SiO}_2$ ) и два типа флокулянтов: высокомолекулярный полиэлектролит со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия (реагент А) и полимерный коагулянт с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (реагент К). Основные методы включали: лазерную дифракционную гранулометрию (Fritsch Analysette 22) для оценки агрегирования частиц; лабораторное вакуумное фильтрование на воронке Бюхнера при  $\Delta P = 85 \text{ кПа}$  для определения удельного сопротивления осадка ( $R_{\text{ос}}$ ); измерение остаточной влажности по ГОСТ 12764-73. По результатам работы было определено, что оба флокулянта эффективно агрегируют мелкие частицы. При оптимальных дозах (Реагент А: 2,5–5 г/т; Реагент К: 10–20 г/т) достигается: снижение выхода класса  $< 5 \text{ мкм}$  в 2,3–2,7 раза (с 18,3 до 5, 2–6,4%) за счет их перехода в более крупные агрегаты. Увеличение доли агрегатов размером 30–44 мкм в 2,2–2,3 раза (с 14,1 до 30,4–36,3%). Минимальное удельное сопротивление осадка ( $3,3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$  для реагента А и  $4,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$  для реагента К). Снижение остаточной влажности осадка (до 14,12% для реагента А и 13,57% для реагента К против 14,18% без реагентов). Превышение оптимальных доз ведет к гелеобразованию, росту сопротивления осадка и влажности из-за переуплотнения осадка.

**Ключевые слова:** железорудный концентрат, фильтрование, флокулянты, керамический вакуум-фильтр, влажность осадка, удельное сопротивление осадка.

---

**Для цитирования:** Чылбак-оол Е. Д., Конюхов Ю. В., Дмитракова У. В., Николаев А. А., Сизова А. С. Применение флокулянтов для повышения эффективности фильтрования железорудных концентратов с низким содержанием  $\text{SiO}_2$  // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 10. – С. 37-47. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_10\_0\_37.

---

## Improving the filtration efficiency of iron ore concentrates with low $\text{SiO}_2$ content using flocculants

E.D. Chylbak-ool<sup>1,2</sup>, Yu.V. Konyukhov<sup>1</sup>, U.V. Dmitrakova<sup>2</sup>, A.A. Nikolaev<sup>1</sup>, A.S. Sizova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru

<sup>2</sup> NTC Bakor LLC, Moscow, Russia

---

**Abstract:** This study addresses the urgent problem of enhancing the filtration efficiency of flotation iron ore concentrates characterized by low silica content ( $\text{SiO}_2$  ~2.4%) and a high proportion of slime particles (<5  $\mu\text{m}$ ). This challenge arises from the necessity for deep beneficiation to produce high-quality direct reduction pellets. The primary difficulty lies in the high specific cake resistance and residual moisture content of the product during the dewatering of such finely dispersed concentrates on ceramic disc vacuum filters, which are widely used in industry due to their energy efficiency. The research aimed to identify and optimize the type and dosage of flocculants for the effective aggregation of fine particles to improve filtration performance on ceramic disc vacuum filters. The influence of flocculant types on the filtration of difficult-to-dewater flotation iron ore concentrates with low  $\text{SiO}_2$  content and high slimes content was comprehensively investigated. The study materials comprised: an iron ore concentrate (69.7% total Fe, 2.4%  $\text{SiO}_2$ ) and two types of flocculants: a high-molecular-weight polyelectrolyte with medium anionicity based on acrylamide and sodium acrylate (Reagent A), and a polymeric coagulant with high flocculating ability, cationic in nature with high charge density based on polydiallyldimethylammonium chloride (Reagent K). The main methods included: laser diffraction particle size analysis (Fritsch Analysette 22) to assess particle aggregation; laboratory-scale vacuum filtration using a Büchner funnel at  $\Delta P = 85$  kPa to determine specific cake resistance; and measurement of residual moisture content according to GOST 12764-73. The results demonstrated that both flocculants effectively aggregated fine particles. At optimal dosages (Reagent A: 2.5–5 g/t; Reagent K: 10–20 g/t), the following were achieved: A 2.3–2.7-fold reduction in the proportion of the <5  $\mu\text{m}$  fraction (from 18.3 to 5.2–6.4%) due to their incorporation into larger aggregates. A 2.2–2.3-fold increase in the proportion of aggregates sized 30–44  $\mu\text{m}$  (from 14.1 to 30.4–36.3%). Minimal specific cake resistance ( $3.3 \times 10^{13}$  m<sup>-2</sup> for Reagent A and  $4.7 \times 10^{13}$  m<sup>-2</sup> for Reagent K). Reduced residual cake moisture (down to 14.12% for Reagent A and 13.57% for Reagent K, compared to 14.18% without reagents). Exceeding the optimal dosages led to gelation, increased cake resistance, and higher moisture content due to cake over-compaction.

**Key words:** iron ore concentrate, filtration, flocculants, ceramic vacuum filter, sediment moisture, sediment resistivity

**For citation:** Chylbak-ool E. D., Konyukhov Yu. V., Dmitrakova U. V., Nikolaev A. A., Sizova A. S. Improving the filtration efficiency of iron ore concentrates with low  $\text{SiO}_2$  content using flocculants. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(10):37-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_10\_0\_37.

---

## Введение

В связи с тенденциями уменьшения выбросов углекислого газа в атмосферу возрастают объемы производства высококачественного магнетитового концентрата для прямого восстановления железа [1]. Наибольшее распространение в промышленности получили технологии Midrex (США), HyL (Мексика), COREX (Фест Альпине), агрегат Круппа (Германия), ROMELT (Россия) [2], которые отличаются, главным образом, системой подачи газов. Восстановление проводят в шахтных печах газообразным восстановителем, полученным путем конверсии природного газа. Таким образом, для производства железа по технологиям Midrex и HyL не требуется коксохимическое производство и отсутствуют отходы в виде шлака [3]. Также вышеперечисленные технологии получения железа прямого восстановления приобретают популярность благодаря своей потенциальной способности снижать потребление энергии в сталелитейной промышленности [2/4].

К недостаткам, применяемых методов, можно отнести более высокие требования к исходному сырью – DRI окатышам (от англ. Direct Reduced Iron). В частности, содержание железа в концентрате для производства окатышей должно превышать 68 – 69% [4]. Данное требование приводит к необходимости введения дополнительных стадий обогащения [5], таких как более тонкий помол для раскрытия сростков, что, в свою очередь, приводит к возникновению шламов и увеличению сопротивления осадка. Кроме этого, горно-обоганительные комбинаты вынуждены применять обратную катионную флотацию [6, 7] для обеспечения нужного качества концентратов. Таким образом, уменьшение остаточного количества  $\text{SiO}_2$  и дополнительные операции негативно сказываются на эффективности передела

фильтрации. [8]. Особенно остро проблема проявляется для концентратов с высоким содержанием тонкодисперсных (шламистых) фракций (<5 мкм), доля которых после дополнительных стадий тонкого измельчения и обратной катионной флотации может достигать 20%.

В настоящее время на обогащательных фабриках используются разнообразные типы фильтровальных аппаратов такие как: барабанные и дисковые вакуумные фильтры, ленточные вакуум-фильтры, патронные и листовые напорные фильтры, горизонтальные и башенные фильтр-прессы [9]. При всем разнообразии типов оборудования, наиболее широкое применение при фильтрации железорудных концентратов получили дисковые вакуумные фильтры, в частности керамические дисковые вакуум-фильтры. Которые позволяют снизить удельный расход электроэнергии, увеличить удельную производительность, что снижает эксплуатационные затраты в сравнении с тканевыми вакуум-фильтрами [10]. Ключевым преимуществом керамического дискового вакуум-фильтра при работе со шламистыми суспензиями является их способность создавать более высокий вакуум (до –0,9 бар), что критически важно для эффективного обезвоживания суспензий с тонкодисперсными частицами.

Несмотря на широкое применение флокулянтов в других областях (угледобыча, цветная металлургия, очистка сточных вод [11 – 16]), механизм их действия и оптимальные режимы применения для флотационных железорудных концентратов с низким содержанием  $\text{SiO}_2$  и высокой шламистостью, обезвоживаемых именно на керамических вакуум-фильтрах, изучены недостаточно [11, 12], [13, 14] [15, 16].

В связи с вышеизложенным, целью исследования является поиск типа реагента для повышения эффективности

Таблица 1

**Гранулометрический состав исходной пробы флотационного железорудного концентрата**

**Particle size distribution of the initial flotation iron ore concentrate sample**

Класс крупности, мкм	Выход класса, %
-63+50	0,05
-50+44	0,76
-44+30	14,13
-30+25	7,85
-25+20	10,89
-20+15	16,26
-15+10	12,85
-10+5	18,92
-5+2	12,14
-2+1	2,61
-1+0	3,54
Итого	100,00

фильтрации флотационных железорудных концентратов с низким содержанием  $\text{SiO}_2$  на керамических дисковых вакуум-фильтрах, которые позволят повысить производительность при приемлемой влажности получаемого осадка.

**Объекты и методы исследования**

Объектом исследования являлся железорудный концентрат с массовой долей железа общего 69,7%, массовой долей кремнезема 2,4%. Проба сформирована из осадка керамических дисковых вакуум-фильтров КДФ-90 участка фильтрации во время производства флотационного железорудного концентрата. Данные гранулометрического состава (табл. 1) свидетельствуют о высоком содержании мелкодисперсных частиц. Их размеры соответствуют диапазону размеров пор на поверхности керамических фильтрующих элементов, варьирующему от 1,8 до 10,5 мкм в зависимости от типа.

Для оценки влияния различных реагентов на свойства суспензии были выбраны: высокомолекулярный полиэлектролит со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия (реагент А) и полимерный коагулянт с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (реагент К). Выбранные аббревиатуры указывают на заряд соответствующего реагента: реагент А – анионный, реагент К – катионный.

Из концентрата готовили водную суспензию (250 мл) с содержанием твердой фазы 50% (масс.). рН суспензии корректировали раствором гидроксида натрия (NaOH) до значений 8–9. В подготовленную суспензию дозировали реагенты из расчета от 2,5 до 40 г на 1 т сухого вещества концентрата. Суспензию перемешивали 5 мин и затем отстаивали 5 мин перед измерениями. Для определения степени агрегирования частиц при применении реагентов А и К при различных расходах применялся метод лазерной дифракции с использованием установки Fritsch Particle Sizer «Analysette 22».

Измерения распределения частиц по крупности проводились с выключенным ультразвуком и минимальной мощности насоса для предотвращения разрушения полученных агрегатов.

Фильтрация проводилась с помощью воронки Бюхнера и колбы Бунзена, которые были подключены к ресиверу с вакуумом. Перепад давления составлял 85 кПа. В качестве фильтрующей перегородки использовались фильтры беззоленные сорта «белая лента». Регистрация перепада давления и объема отводимого фильтрата с привязкой ко времени фильтрации проводилось при помощи специальных датчиков по методике, разработанной в «НТЦ «Бакор».

ченные данные позволили рассчитать удельное объемное сопротивление осадков [17], которое рассчитывалось по основному уравнению фильтрации, интегрированного для условий постоянной разности давлений которое имеет следующий вид:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\mu r X}{2\Delta PF^2} V + \frac{\mu R_{пер}}{\Delta PF}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость жидкой фазы суспензии, (Н·с)/м<sup>2</sup>;  $r$  – удельное объемное сопротивление слоя осадка, м<sup>2</sup>;  $X$  – объем осадка, образующийся при получении 1 м<sup>3</sup> фильтрата, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – разность давлений, Па;  $F$  – поверхность фильтрования, м<sup>2</sup>;  $R_{пер}$  – сопротивление фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

В координатах  $\tau / V$  от  $V$  уравнение (1) является уравнением прямой и имеет вид:

$$\tau / V = MV + K, \quad (2)$$

где  $M$  – константа фильтрации, характеризующая удельное сопротивление слоя осадка, с/м<sup>3</sup>;  $K$  – константа фильтрации, характеризующая сопротивление фильтровальной перегородки, с/м<sup>3</sup>.

Константы  $M$  и  $K$  находились по графику  $\tau / V = f(V)$ , построенному по экспериментальным точкам,  $M$  равна тангенсу угла наклона этой прямой, а  $K$  – отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат. По найденным значениям  $M$  и  $K$  определялось удельное сопротивление слоя осадка:

$$r = \frac{2M\Delta PF^2}{\mu X}. \quad (3)$$

Остаточную влажность определяли согласно ГОСТ 12764-73, согласно которому полученные навески помещались в противень и высушивались в сушильном шкафу при температуре (105±5) °С до постоянной массы.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены распределения частиц по крупности исходного концентрата и после добавления реагентов. Видно, что применение реагентов обоих типов приводит к смещению распределения в сторону более крупных частиц, что выражается в отсутствии наиболее мелких частиц крупностью менее 2 мкм после обработки исходного материала по причине образования ими более крупных агрегатов и ярко выраженным увеличением содержания ча-

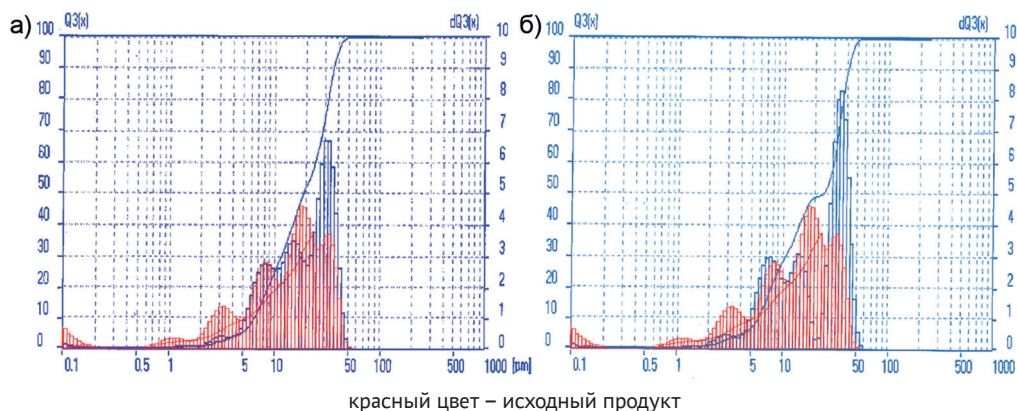


Рис. 1. Распределение частиц по крупности: при применении реагента А с расходом 5 г/т (а); при применении реагента К с расходом 40 г/т (б)

Fig. 1. Particle size distribution curves: application of Reagent A at 5 g/t (a); application of Reagent K at 40 g/t (b)

**Таблица 2**

**Изменение выхода классов крупности  $-5+0$  мкм и  $-44+30$  мкм при применении реагентов А и К**  
**Variation in the yield of the  $-5+0$   $\mu\text{m}$  and  $-44+30$   $\mu\text{m}$  particle size classes upon application of Reagents A and K**

Реагент	Расход реагента, г/т	Выход класса крупности, %	
		$-5+0$ мкм	$-44+30$ мкм
—	—	18,3	14,1
Реагент А	2,5	5,4	30,4
	5	5,2	24,8
	7,5	13,9	12,0
	10	13,6	10,6
Реагент К	10	8,4	36,3
	20	8,6	33,0
	30	8,1	32,6
	40	6,4	35,1

стиц крупностью 30–44 мкм. При этом доля частиц фракции 5–10 мкм количественно не изменяется, что можно объяснить относительно равномерным агрегированием частиц и их переходом с одной фракции в другую.

В связи с тем, что наибольший практический интерес представляют фракции менее 5 мкм и наиболее крупная фракция, в данном случае характеризующаяся самым высоким пиком в распределении частиц, в табл. 2 представлены выходы данных классов во всех экспериментах.

По результатам измерений выявлено, что при использовании реагента А наиболее выраженное изменение в выходе классов наблюдается при расходе 2,5–5 г/т, при котором выход класса  $-5+0$  мкм снижается с 18,3 до 5,2–5,4%, а выход класса  $-44+30$  мкм возрастает с 14,1 до 24,8–30,4%.

При использовании реагента К изменение в выходе классов наблюдается во

всем диапазоне расхода реагента от 10 до 40 г/т. При этом выход класса  $-5+0$  мкм снижается с 18,3 до 6,4–8,6%, выход класса  $-44+30$  мкм возрастает с 14,1 до 32,6–36,3%.

Из результатов проведенных измерений можно сделать вывод о том, что для реагента А существует определенный интервал эффективного расхода. Низкий расход не обеспечивается достаточное взаимодействие частиц с реагентом, а при слишком высоком расходе полное покрытие поверхности частиц предотвращает дальнейшую агрегацию частиц [18]. Так наиболее оптимальным расходом для реагента А является диапазон 2,5–5 г/т, а для реагента К 10–40 г/т. Различие в расходах можно объяснить различным механизмом взаимодействия данных реагентов [19]:

- электростатических взаимодействий — когда полиэлектролит адсорбируется на поверхности противоположно заряженной частицы (реагент К);
- образование водородных связей — между, например, амидными группами цепи и гидроксильными группами на поверхности частиц; образование ионных связей — с участием ионов поливалентных металлов (реагент А).

Таким образом было установлено, что применение обоих реагентов положительно сказывается на процессе агрегирования шламистых частиц.

На следующем этапе исследовали влияние данных реагентов на процесс фильтрации. На рис. 2 представлены зависимости удельного сопротивления осадка и влажности от расходов реагентов по усредненным данным трех параллельных опытов. Диапазоны расходов реагентов были выбраны на основании результатов исследований по агрегированию.

Из полученных данных видно, что без применения реагентов удельное со-

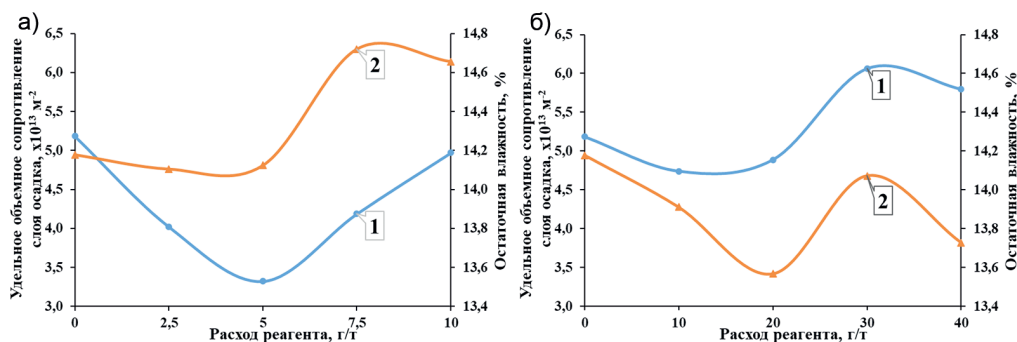


Рис. 2. Зависимости сопротивления слоя (1) и остаточной влажности (2) осадка от типа реагента и его расхода: реагент А (а); реагент К (б)

Fig. 2. Plots of (1) cake resistance and (2) residual moisture versus reagent type and dosage: reagent A (a); reagent K (b)

противление осадка составило  $5,2 \cdot 10^{13}$  м<sup>-2</sup>, при влажности осадка 14,18%. При использовании реагента А было зафиксировано наименьшее значение удельное сопротивление осадка  $3,3 \cdot 10^{13}$  м<sup>-2</sup> при расходе 5 г/т, без значительного изменения влажности получаемого осадка, которая составила 14,12%. В свою очередь, удельное сопротивление осадка при добавлении компонента К имело наименьшее значение в  $4,7 \cdot 10^{13}$  м<sup>-2</sup> при расходе 10 г/т. Однако, наименьшая остаточная влажность 13,57% была зафиксирована при расходе реагента 20 г/т, при котором удельное сопротивление осадка составило  $4,9 \cdot 10^{13}$  м<sup>-2</sup>. При превышении оптимальных расходов реагентов (реагент А — 5 г/т, реагент К — 20 г/т) наблюдается увеличение удельного сопротивления осадка и увеличение влажности получаемого осадка. Это связано с несколькими факторами:

- избыток полимера приводит к перенасыщению поверхности частиц, что вместо агрегирования вызывает стабилизацию (пептизацию) или образование очень мелких, плотных агрегатов;
- свободные молекулы полимера в растворе увеличивают вязкость фильтра;
- образующаяся пространственная сетка из полимера и частиц обладает высокой водоудерживающей способностью

и низкой пористостью, резко увеличивая сопротивление фильтрации [20].

Минимальные значения удельного объемного сопротивления осадка и влажности достигаются при тех дозах реагентов (реагент А: 5 г/т, реагент К: 20 г/т), которые обеспечивают максимальное агрегирование мелких частиц. Это подтверждает, что основным фактором улучшения фильтруемости является эффективная флокуляция шламистой составляющей.

## Выводы

1. Показано, что применение флокулянтов высокомолекулярного полиэлектролита со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия и полимерного коагулянта с высокой флокулирующей способностью имеющий катионный характер с высокой плотностью заряда позволяет повысить эффективность фильтрации железорудных концентратов с низким содержанием SiO<sub>2</sub> за счет агрегирования мелких частиц. Оба реагента смещают распределение частиц в сторону более крупных фракций, уменьшая долю частиц <5 мкм в 2,3–2,7 раза и увеличивая фракцию 30–44 мкм в 2,2–2,3 раза;

2. Определены оптимальные дозы реагентов: для реагента А — 2,5–5 г/т,

для реагента К — 10–20 г/т. В этих диапазонах достигается минимальное удельное сопротивление осадка ( $3,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  для реагента А и  $4,7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  для реагента К) и снижение влажности осадка;

3. Установлено, что превышение оптимальных доз приводит к гелеобразованию, увеличению сопротивления осадка и влажности, что обусловлено затруднением фильтрации жидкости через переуплотненный слой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thang Toan Vu, Junhyeong Seo, Eunkyu Kim, Seung Gul Ryoo, Byung Cheol Park, Daesung Song* Techno-economic analysis of integrated MIDREX process with CO<sub>2</sub> capture and storage: Evaluating sustainability and viability for iron production // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024, vol. 189, pp. 1314–1322. DOI: 10.1016/j.psep.2024.07.005.
2. *Румянцева Г. А., Немененко Б. М., Арабей А. В., Трибушевский Л. В.* «Зеленые» технологии в металлургическом производстве — мечта или реальность? // *Литье и металлургия*. — 2022. — № 4. — С. 63–69. DOI: 10.21122/16836065202246369.
3. *Мохова А. В.* «Зеленые» технологии в металлургии / *Наука ЮУРГУ. Секции технических наук. Материалы 74-й научной конференции*. — Челябинск, 2022. — С. 490–492.
4. *Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф.* *Металлургия железа: учебник для вузов*. — М.: Академкнига, 2007. — 464 с.
5. *Пелевин А. Е.* Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 256. — С. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
6. *Варичев А. В., Кретов С. И., Кузин В. Ф.* Крупномасштабное производство железорудной продукции в Российской Федерации. — М.: Изд-во МГГУ, 2010. — 395 с.
7. *Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Гридасов И. Н., Шелепов Э. В.* Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» // *Горная промышленность*. — 2020. — № 4. — С. 98–103. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.
8. *Воловиков А. Ю.* Влияние флотационных реагентов на фильтрующие свойства керамических фильтров при обезвоживании железорудного концентрата: автореф... дис. кан. техн. наук. — СПб., 2014. — 20 с.
9. *Дмитракова У. В., Круглов А. В., Чылбак-оол Е. Д., Юшина Т. И.* Опыт применения различного фильтровального оборудования на отечественных предприятиях // *Обогащение руд*. — 2021. — № 4. — С. 52–56. DOI: 10.17580/or.2021.04.09.
10. *Красный Б. Л., Зимбовский И. Г., Дмитракова У. В., Чылбак-оол Е. Д.* Химический способ восстановления фильтрующей способности керамических фильтрующих элементов // *Черные металлы*. — 2021. — № 11. DOI: 10.17580/chm.2021.11.01.
11. *Лавриненко А. А., Гольберг Г. Ю.* Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. — 2024. — Т. 22. — № 2. — С. 58–70. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70.
12. *Khazaie A., Mazarji M., Samali B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Soldatov A.* A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry // *Water*. 2022, vol. 14, article 918. DOI: 10.3390/w14060918.
13. *Чернигов Д. А., Богородский А. В., Набиулин Р. Н., Минева Т. С.* Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2021. — Т. 25. — № 3. — С. 391–401. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-391-401.
14. *Meng S., Wen S., Han G., Wang X., Feng Q.* Wastewater treatment in mineral processing of non-ferrous metal resources: A review // *Water*. 2022, vol. 14, article 726. DOI: 10.3390/w14050726.
15. *Mohammed Shadi S. Abujazar, Sakine Ugurlu Karaağaç, Salem S. Abu Amr, Motasem Y. D. Alazaiza, Mohammed J. K. Bashir* Recent advancement in the application of hybrid coagulants in coagulation-flocculation of wastewater: A review // *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 345, article 131133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131133.

16. Ульрих Е. В., Баркова А. С. Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах // Известия КГТУ. — 2022. — № 66. — С. 53–64. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-66-53-64.

17. Кожонов А. К., Ящук А. А., Дуйшонбаев Н. П. Исследование сгущаемости продуктов флотации полимерными флокулянтами и определение влияния флокулянтов на процесс фильтрации // Наука вчера, сегодня, завтра. — 2016. — № 12-2(34). — С. 32–47.

18. Chin C. H., Mughtar A., Azhari C. H., Razali M., Aboras M. Optimization of pH and dispersant amount of Y-TZP suspension for colloidal stability // *Ceramics International*. 2015, vol. 41, pp. 9939–9946. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.04.073.

19. Hyrycz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives // *Science of The Total Environment*. 2022, vol. 820, article 153328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153328.

20. Панфилов П. Ф. Исследование влияния перемешивания флокулянтов в статических смесителях с суспензиями отходов флотации на эффективность их обезвоживания на гравитационном столе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2005. — № 6. — С. 329–331. **VIAS**

## REFERENCES

1. Thang Toan Vu, Junhyeong Seo, Eunkyuu Kim, Seung Gul Ryoo, Byung Cheol Park, Daesung Song Techno-economic analysis of integrated MIDREX process with CO<sub>2</sub> capture and storage: Evaluating sustainability and viability for iron production. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024, vol. 189, pp. 1314–1322. DOI: 10.1016/j.psep.2024.07.005.

2. Rumiantseva G. A., Nemenenok B. M., Arabey A. V., Tribushevskiy L. V. «Green» technologies in metallurgical production — a dream or reality? *Foundry production and metallurgy*. 2022, no. 4, pp. 63–69. [In Russ]. DOI: 10.21122/16836065202246369.

3. Mokhova A. V. «Green» technologies in metallurgy. *Nauka YuURGU. Seksii tekhnicheskikh nauk. Materialy 74-y nauchnoy konferentsii* [Nauka JuURGU. Technical Sciences Sections. Proceedings of the 74th scientific conference], Chelyabinsk, 2022, pp. 490–492. [In Russ].

4. Yusfin Yu. S., Pashkov N. F. *Metallurgiya zheleza: uchebnik dlya vuzov* [Metallurgia zheleza: textbook for universities], Moscow, Akademkniga, 2007, 464 p.

5. Pelevin A. Well. Technologies for processing Russian iron ores and improving their effectiveness. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 579–592. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

6. Varichev A. V., Kretov S. I., Kuzin V. F. *Krupnomasshtabnoe proizvodstvo zhelezorudnoy produktsii v Rossiyskoy Federatsii* [Large-scale iron ore production in the Russian Federation], Moscow, Izd-vo MGGU, 2010, 395 p.

7. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Case study: advanced solutions applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to improve ferruginous quartzite concentration performance. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 4, pp. 98–103. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

8. Volovikov A. Yu. *Vliyanie flotatsionnykh reagentov na fil'truyushchie svoystva keramicheskikh fil'trov pri obezvozhivanii zhelezorudnogo kontsentrata* [Influence of flotation and reagent filtration properties ceramic fillets in de-energizing and iron concentrate], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2014, 20 p.

9. Dmitrakova U. V., Kruglov A. V., Chylbak-ool E. D., Yushina T. I. Experience in the use of various filtration equipment in domestic enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2021, no. 4, pp. 52–56. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.04.09.

10. Krasniy B. L., Zimbovskiy I. G., Dmitrakova U. V., Chylbak-ool E. D. Chemical method wax-works filtration abilities ceramic filtration Flemings. *Stahl und eisen*. 2021, no. 11. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2021.11.01.

11. Lavrinenko A. A., Goliberg G. Yu. In the meantime, the distance and directions of the process of separation of suspensory product enriching uglei with a sample of flocculantov. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 58–70. [In Russ]. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70.

12. Khazaie A., Mazarji M., Samali B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Mandzhiyeva S., Soldatov A. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*. 2022, vol. 14, article 918. DOI: 10.3390/w14060918.

13. Chernigov D. A., Bogorodskiy A. V., Nabiulin R. N., Mineeva T. S. Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021, vol. 25, no. 3, pp. 391 – 401. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-391-401.
14. Meng S., Wen S., Han G., Wang X., Feng Q. Wastewater treatment in mineral processing of non-ferrous metal resources: A review. *Water*. 2022, vol. 14, article 726. DOI: 10.3390/w14050726.
15. Mohammed Shadi S. Abujazar, Sakine Ugurlu Karaağaç, Salem S. Abu Amr, Motasem Y. D. Alazaiza, Mohammed J. K. Bashir Recent advancement in the application of hybrid coagulants in coagulation-flocculation of wastewater: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 345, article 131133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131133.
16. Ul'rikh E. V., Barkova A. S. Parameters of wastewater flocculation with subsequent filtration on press filters. *KSTU News*. 2022, no. 66, pp. 53 – 64. [In Russ]. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-66-53-64.
17. Kozhonov A. K., Yashchuk A. A., Duyshonbaev N. P. Polymer filter on flaps without investigation of cloths by flocculants to determine in the process the products of influence. *Nauka vchera, segodnya, zavtra*. 2016, no. 12-2(34), pp. 32 – 47. [In Russ].
18. Chin C. H., Muchtar A., Azhari C. H., Razali M., Aboras M. Optimization of pH and dispersant amount of Y-TZP suspension for colloidal stability. *Ceramics International*. 2015, vol. 41, pp. 9939 – 9946. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.04.073.
19. Hyrycz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczyk S., Matuszak M. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives. *Science of The Total Environment*. 2022, vol. 820, article 153328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153328.
20. Panfilov P. F. Investigation of the effect of mixing flocculants in static mixers with suspensions of flotation waste on the effectiveness of their dewatering on a gravity table. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2005, no. 6, pp. 329 – 331. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чылбак-оол Евгений Джамильевич<sup>1,2</sup> – аспирант;  
 научный сотрудник, e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru,  
 ORCID ID: 0009-0007-9915-4809,  
 Конюхов Юрий Владимирович<sup>1</sup> – д-р техн. наук,  
 зав. кафедрой, e-mail: ykonukhov@misis.ru,  
 ORCID ID: 0000-0003-0219-4809,  
 Дмитракова Ульяна Вадимовна<sup>2</sup> – руководитель  
 научно-исследовательского центра инновационных решений  
 по обезвоживанию и обогащению, e-mail: dmitrakova@ntcbakor.ru,  
 Николаев Александр Александрович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
 доцент, доцент, e-mail: nikolaevorg@mail.ru,  
 ORCID ID: 0000-0003-1687-2332,  
 Сизова Анастасия Сергеевна<sup>2</sup> – канд. техн. наук,  
 старший научный сотрудник, e-mail: sizova@ntcbakor.ru,  
 ORCID ID: 0009-0004-4261-6660,  
<sup>1</sup> НИТУ МИСИС,  
<sup>2</sup> ООО «Научно-технический центр «Бакор».  
**Для контактов:** Чылбак-оол Е.Д., e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.D. Chylbak-ool<sup>1,2</sup>, Graduate Student;  
 Researcher, e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru,  
 ORCID ID: 0009-0007-9915-4809,  
 Yu. V. Konyukhov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.),  
 Head of Chair, e-mail: ykonukhov@misis.ru,  
 ORCID ID: 0000-0003-0219-4809,

*U. V. Dmitrakova*<sup>2</sup>, Head of the Research Center  
for Innovative Solutions for Dewatering and Enrichment,  
e-mail: [dmitrakova@ntcbakor.ru](mailto:dmitrakova@ntcbakor.ru),

*A. A. Nikolaev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Assistant Professor, e-mail: [nikolaevopr@mail.ru](mailto:nikolaevopr@mail.ru),  
ORCID ID: 0000-0003-1687-2332,

*A. S. Sizova*<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher, e-mail: [sizova@ntcbakor.ru](mailto:sizova@ntcbakor.ru),  
ORCID ID: 0009-0004-4261-6660,

<sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,

<sup>2</sup> NTC Bakor LLC, 108851, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** E. D. Chylbak-ool, e-mail: [chylbak-ool@ntcbakor.ru](mailto:chylbak-ool@ntcbakor.ru).

Получена редакцией 03.06.2025; получена после рецензии 27.07.2025; принята к печати 10.09.2025.

Received by the editors 03.06.2025; received after the review 27.07.2025; accepted for printing 10.09.2025.



---

**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ  
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)**

---

**ВЫБОР СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ И ОБОСНОВАНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

(2025, № 9, СВ 13, 20 с. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_9\_13\_3)

*Савич Игорь Николаевич* — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail: [isavichn@mail.ru](mailto:isavichn@mail.ru),  
*Павленко Сергей Витальевич* — первый заместитель генерального директора — исполнительный директор,  
Акционерная компания «Алмазы России-Саха» (ПАО).

Наиболее сложным, практически определяющим стабильную и эффективную работу горнодобывающего предприятия является выбор системы разработки, обоснование ее параметров и технологии производства с последующей их адаптацией к конкретным горнотехническим условиям рудных месторождений. Та или другая система и соответствующая ей технология оказывают влияние на размеры зон опасных деформаций, а следовательно, на принятие решений по размещению новых, сносу или охране имеющихся сооружений и природных объектов. Выбор систем разработки осуществляется посредством отбора при анализе постоянных и переменных факторов, определяющих горнотехнические условия добычи и сравнительной оценки их технико-экономических показателей с учетом уровня потерь и разубоживания.

Ключевые слова: геологические и горнотехнические условия, теоретические основы проектирования горнотехнических систем, выбор систем разработки, конструктивные и технологические решения, обоснование параметров, системы разработки, рудные месторождения, принудительное обрушение руд и вмещающих пород, закладка выработанного пространства, комбинированные системы.

**SELECTION OF AN UNDERGROUND MINING SYSTEM AND JUSTIFICATION  
OF ITS PARAMETERS IN THE DESIGN OF UNDERGROUND MINES**

*I. N. Savich*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: [isavichn@mail.ru](mailto:isavichn@mail.ru),  
*S. V. Pavlenko*, First Deputy General Director — Executive Director, Almazay Rossii-Sakha Joint Stock Company.

The most difficult, practically determining the stable and efficient operation of a mining enterprise is the choice of a development system, justification of its parameters and production technology, followed by their adaptation to the specific mining conditions of ore deposits. One or another system and its corresponding technology have an impact on the size of the zones of dangerous deformations, and therefore on the decision-making on the placement of new, demolition or protection of existing structures and natural objects. The choice of mining systems is carried out by selecting constant and variable factors that determine the mining conditions of production and a comparative assessment of their technical and economic indicators, taking into account the level of losses and dilution.

Key words: geological and mining engineering conditions, theoretical foundations of mining engineering systems design, selection of development systems, design and technological solutions, justification of parameters, development systems, ore deposits, forced collapse of ores and host rocks, laying of the developed space, combined systems.