

Исследование влияния технологических параметров на процесс регенерации керамических дисковых вакуум-фильтров

Л.Г. Герасимова¹, Д.В. Майоров¹ ✉, Е.А. Адамов²

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева, Кольский научный центр Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

²АО «Апатит», Кировский филиал, г. Кировск, Российская Федерация

✉ d.maierov@ksc.ru

Резюме: Керамические вакуум-фильтры, обладающие рядом преимуществ по сравнению с фильтрами, в которых фильтровальной перегородкой является фильтроткань, находят все большее применение в разнообразных технологических процессах, в частности, при обезвоживании минеральных суспензий при обогащении разнообразных руд. Однако со временем вследствие засорения пор керамического материала твердыми частицами суспензий происходит увеличение их гидравлического сопротивления и, как следствие, снижение производительности фильтрации, требующее регенерации керамических фильтр-ячеек. Цель исследования – разработка режимов азотнокислотной регенерации керамических фильтрующих элементов, используемых в технологическом цикле производства апатитового концентрата при обогащении апатито-нефелиновых руд в Кировском филиале АО «Апатит». На основании исследований процесса регенерации керамического вакуум-фильтра после загрязнения его в процессе фильтрации пульпы апатитового концентрата минеральными частицами рекомендованы оптимальные условия проведения процесса: концентрация HNO_3 – не менее 1%; продолжительность регенерации – до двух часов при температуре 20°C; не менее 1 ч – при температуре 40°C. Результаты исследования могут быть использованы для интенсификации процесса регенерации керамических вакуум-фильтров в горно-химической промышленности.

Ключевые слова: апатитовый концентрат, обезвоживание, фильтрация, керамический дисковый фильтр, процесс регенерации, азотная кислота, разложение апатитового концентрата

Для цитирования: Герасимова Л.Г., Майоров Д.В., Адамов Е.А. Исследование влияния технологических параметров на процесс регенерации керамических дисковых вакуум-фильтров. *Горная промышленность*. 2026;(3):211–216. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-211-216>

Research into the effects of technological parameters on regeneration of ceramic disc for vacuum filters

L.G. Gerasimova¹, D.V. Maiorov¹ ✉, E.A. Adamov²

¹ Tananaev Institute of Chemistry, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

² Apatit JSC, Kirovsk branch, Kirovsk, Russian Federation

✉ d.maierov@ksc.ru

Abstract: Ceramic vacuum filters offer a number of advantages over the designs that use filter cloth as the filtering membrane. Ceramic filters are increasingly used in a variety of technological processes, such as dehydration of mineral suspensions when processing various ores. However, over time, due to clogging of pores in the ceramic material by solid particles of the suspensions, their hydraulic resistance increases, therefore, the filtration performance decreases and regeneration of the ceramic filter cells is required. The goal of this work was to develop modes of nitric acid regeneration of the ceramic filter elements used in the technological cycle for production of apatite concentrate as part of apatite-nepheline ore processing at the Kirovsk branch of Apatit JSC. Research into regeneration of ceramic vacuum filters upon their contamination with mineral particles during filtration of the apatite concentrate pulp helped to formulate the following optimal process conditions: HNO_3 concentration should not fall below 1%; regeneration time is up to 2 hours at the temperature of 20°C and at least 1 hour at the temperature of 40°C. The results of the study can be used to intensify the regeneration process of ceramic vacuum filters in the mining and chemical industries.

Keywords: apatite concentrate, dehydration, filtration, ceramic disc filter, regeneration process, nitric acid, decomposition of apatite concentrate

For citation: Gerasimova L.G., Maiorov D.V., Adamov E.A. Research into the effects of technological parameters on regeneration of ceramic disc for vacuum filters. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):211–216. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-211-216>

Введение

Фильтрация пульпы занимает важное место в реализации технологического процесса в обогащении руд цветных, редких и драгоценных металлов, горно-химического сырья и солей [1]. Этот процесс позволяет разделить пульпу на жидкую и твёрдую фазы, одна или обе из которых представляют ценный продукт.

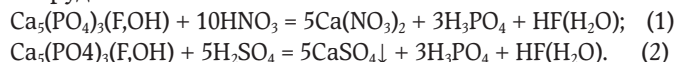
При этом в зависимости от свойств пульпы (суспензии) применяются самые разнообразные типы фильтров (барбанные, рамные, ленточные, нутч-фильтры, план-фильтры, дисковые, патронные и др.), а в качестве фильтрующей перегородки могут использоваться различные материалы: тканевые фильтрующие из хлопковых и синтетических волокон, нетканые фильтрующие (текстильные, керамические, намывные, мембранные и др.), выбор которых производится в зависимости от физико-химических свойств суспензии, характера технологического процесса и требований, предъявляемых к конечным продуктам [2; 3].

В горно-химических производствах при обогащении минерального сырья одними из главных задач, стоящих перед фильтрацией, являются максимальное снижение влагосодержания в концентрате, что позволяет минимизировать затраты на сушку продукта [4–6], а также снижение потерь тонкодисперсных частиц с фильтратом, что крайне важно при переработке бедных руд, где необходимо доизмельчать концентраты, что приводит к появлению трудноулавливаемых тонких частиц.

Ранее на обогатительных фабриках одними из наиболее часто используемых для этих целей фильтров применялись дисковые вакуум-фильтры типа ДОО, в которых использовались секторы с надетыми фильтровальными чехлами [7]. В настоящее время на замену им пришли керамические вакуум-фильтры (КДФ), в которых фильтрующей перегородкой является пористый керамический материал на основе оксида алюминия [8–10]. Керамические вакуум-фильтры характеризуются более длительным сроком эксплуатации за счет их высокой устойчивости к абразивным и химически агрессивным средам, более прочной структурой фильтровальной перегородки, чистым фильтратом и более эффективны в сравнении с тканевыми фильтрами. Также они обеспечивают получение менее влажных кеков фильтрования (на 2–4%) по сравнению с дисковыми вакуум-фильтрами с тканевыми перегородками при высоких показателях энергоэффективности [11–13]. Однако со временем вследствие засорения пор керамического материала твердыми частицами суспензии происходит увеличение гидравлического сопротивления фильтровальных перегородок и, как следствие, снижение производительности фильтрации. Для восстановления проницаемости фильтровальных перегородок применяют различные методы – обратная промывка, ультразвуковая обработка, химическая очистка [14] и их комбинации. Наиболее эффективной, с нашей точки зрения, является химическая очистка, позволяющая растворить забивающие поры фильтрующего материала частицы минералов и тем самым восстановить проницаемость фильтра. Однако публикации на эту тему весьма ограничены.

Целью данной работы явилась разработка режимов азотнокислотной регенерации керамических фильтрующих элементов вакуум-фильтров КДФ, используемых в технологическом процессе обезвоживания апатитового концентрата на действующей обогатительной фабрике ОАО «Апатит» (г. Кировск, Мурманская обл.). Выбор азотной кислоты HNO₃ для регенерации фильтр-ячеек КДФ был

обусловлен тем, что при взаимодействии HNO₃ с апатитом Ca₅[PO₄]₃(F,OH) (реакция 1), являющимся основным компонентом, не образуется твердых (малорастворимых) продуктов, например сульфата кальция CaSO₄ при использовании H₂SO₄ (реакция 2), способных к вторичному загрязнению фильтра. А применение соляной кислоты HCl затруднено вследствие высоких требований к коррозионной защите оборудования:



Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовалась проба апатитового концентрата (АК) текущего производства, предоставленная Кировским филиалом АО «Апатит», химический и гранулометрический состав которой, по данным ИЭХТРАМС КНЦ РАН, приведен в табл. 1.

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) образца АК приведены на рис. 1. РФА проводили методом порошковой дифракции на приборе SHIMADZU XRD-6000 с диапазоном углов 2θ от 6 до 70° с шагом 0,02°. Фазовый состав идентифицировали с использованием Международной базы данных дифракции JCPDC-ICDD 2002.

Таблица 1
Химический и гранулометрический составы апатитового концентрата

Table 1
Chemical composition and particle size distribution of the apatite concentrate

Химический состав, масс. %		Гранулометрический состав, масс. %	
Компонент	Содержание	Фракции, мм	Содержание
P ₂ O ₅	39,03	+0,4	0,60–0,70
CaO	50,52	–0,4+0,2	18,60–18,70
Al ₂ O ₃ общ.	0,78	–0,2+0,16	8,00–8,70
Fe ₂ O ₃	0,62	–0,16+0,1	15,60–17,10
FeO	0,11	–0,1+0,08	11,80–12,50
TiO ₂	0,39	–0,08+0,064	5,40–7,50
MgO	0,04	–0,064+0,04	10,80–13,60
MnO	0,04	–0,04	24,10–26,30
Na ₂ O	0,62	–	–
K ₂ O	0,18	–	–
SiO ₂ общ.	1,29	–	–
F	3,07	–	–

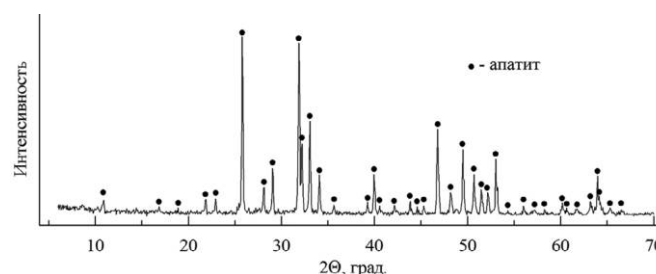


Рис. 1
Дифрактограмма апатитового концентрата

Fig. 1
An XRD pattern of the apatite concentrate

По данным РФА, в образце присутствует только апатит (PDF Card – 04-024-2629). Другие минералы (нефелин, эгирин, сфен и пр.) не обнаружены, что, вероятно, обусловлено их малым содержанием в концентрате.

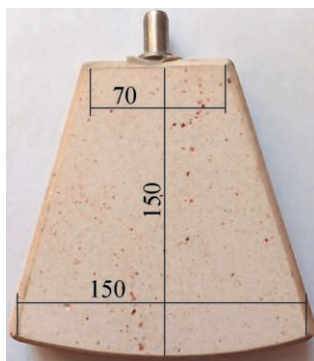
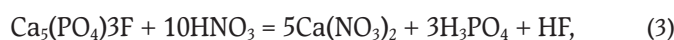


Рис. 2
Внешний вид и размеры
керамической фильтр-ячейки
(области фильтрация), мм

Fig. 2
Visual appearance and
dimensions of the ceramic
filter cell (filtration area), mm

Методика экспериментов по определению влияния параметров азотнокислотного разложения (концентрация и расход HNO_3 , температура и продолжительность процесса) на степень разложения апатитового концентрата заключалась в следующем. В реакционный стакан заливало расчетное количество воды и концентрированной HNO_3 , после чего при перемешивании засыпалась навеска апатитового концентрата. Процесс разложения вели в течение заданного времени. Затем реакционная пульпа подавалась на лабораторный нутч-фильтр для разделения твердой и жидкой фаз. Нерастворимый в кислоте минеральный остаток промывался на фильтре водой. Фильтрат и промывка объединялись и анализировались на содержание CaO методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). Промытый остаток сушили при 105°C до постоянной массы m_t и определяли потерю массы. Концентрация HNO_3 составляла 1 и 3%, расход кислоты – 125 и 250% от стехиометрии по реакции



продолжительность разложения – 10–120 мин; температура процесса – 20 и 40°C . В случае проведения процесса при 40°C и времени разложения более 30 мин процесс во избежание упаривания реакционной пульпы осуществляли в термостатированной трехгорлой колбе, снабженной мешалкой и обратным холодильником. Результаты представлены на рис. 4.

Исследования по регенерации проводили с использованием керамической фильтр-ячейки, предоставленной КФ АО «Апатит» (рис. 2), площадью фильтрации 300 см^2 на установке, схема которой представлена на рис. 3.

Для загрязнения фильтр-ячейки ее размещали в емкости (поз. 2) с мешалкой (поз. 3), содержащей пульпу апатитового концентрата (Т:Ж = 1:10). При включенной мешалке к фильтр-ячейке через емкость для фильтрата (поз. 4), предварительно откалиброванной по объему, подключали вакуум, создаваемый фильтр-насосом ($\Delta P = 0,5 \pm 0,05\text{ атм.}$). По заполнении емкости для фильтрата вынимали фильтр-ячейку и счищали с фильтр-ячейки осадок апатитового концентрата обратно в емкость (поз. 2), куда также переливали фильтрат из емкости (поз. 4), после чего процесс фильтрации повторяли. В процессе фильтрации периодически рассчитывали скорость (производительность) фильтрации U_ϕ по формуле:

$$U_\phi = V_\phi / \tau,$$

где V_ϕ – объем фильтрата; τ – время фильтрации.

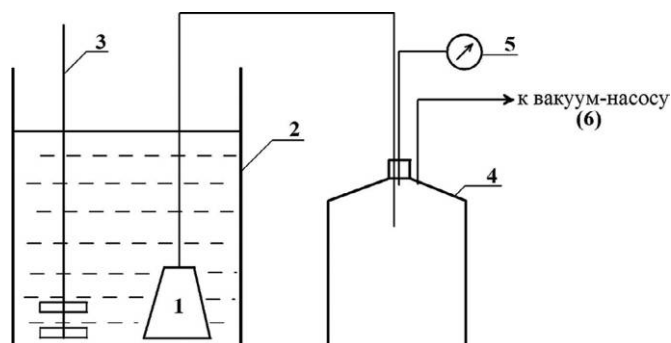


Рис. 3
Схема лабораторной
установки:
1 – керамическая фильтр-
ячейка;
2 – емкость с пульпой
апатитового концентрата;
3 – мешалка;
4 – ёмкость для фильтрата;
5 – вакуум-метр;
6 – вакуум-насос

Fig. 3
A schematic diagram
of the laboratory
setup:
1 – ceramic filter cell;
2 – container with the apatite
concentrate;
3 – agitator;
4 – container for filtrate;
5 – vacuum tube;
6 – vacuum pump

При достижении скорости фильтрации $V \approx 0,5V_0$, где V_0 – первоначальная скорость фильтрации, опыт завершали, и фильтр-ячейка передавалась на регенерацию.

Для исследования процесса регенерации фильтр-ячейки её поверхность очищали от осадка АК и помещали в емкость, в которую заливали раствор HNO_3 требуемой концентрации. Регенерацию фильтр-ячейки проводили подачей через нее раствора HNO_3 из откалиброванной питающей емкости. Для выравнивания потоков проходящего регенерирующего раствора размещение фильтр-ячейки осуществляли горизонтально на подставках. При необходимости для определения влияния температуры на процесс регенерации как сама фильтр-ячейка, так и раствор HNO_3 подогревались до требуемой температуры. По завершении процесса регенерации фильтр-ячейка подвергалась повторному загрязнению в процессе фильтрации через нее пульпы. Степень регенерации η оценивали по соотношению:

$$\eta = (U_{\phi,n} / U_{\phi,1}) \cdot 100\%,$$

где $U_{\phi,1}$ и $U_{\phi,n}$ – скорость (производительность) фильтрации при первой и n-й фильтрации в серии.

В процессе регенерации варьировали концентрацию кислоты, время контакта и температуру процесса, которые составляли: концентрация кислоты C_p : 0,5; 1 и 2%; время контакта τ_p : 1 и 2 ч; температура t_p : 20 и 40°C .

По завершении серии опытов при постоянных значениях параметров регенерации C_p , τ_p и t_p фильтр-ячейка подвергалась длительной (полной) регенерации при $C_p = 5\%$; $\tau_p = 5\text{ ч}$ и $t_p = 20^\circ\text{C}$, после чего проводили новую серию экспериментов с другими значениями C_p , τ_p и t_p .

Результаты и их обсуждение

Влияния параметров азотнокислотного разложения АК на степень разложения приведены на рис. 4. Для удобного восприятия результатов в табл. 2 дополнительно приведены показатели потери массы ($\Delta m_{\text{max}} = (m_{\text{нач}} - m_{\text{кон}}) / m_{\text{нач}}$) и извлечения CaO (η_{max}).

Анализ данных показывает, что концентрация азотной кислоты оказывает меньшее влияние на потерю массы АК и извлечение CaO , чем расход HNO_3 и температура про-

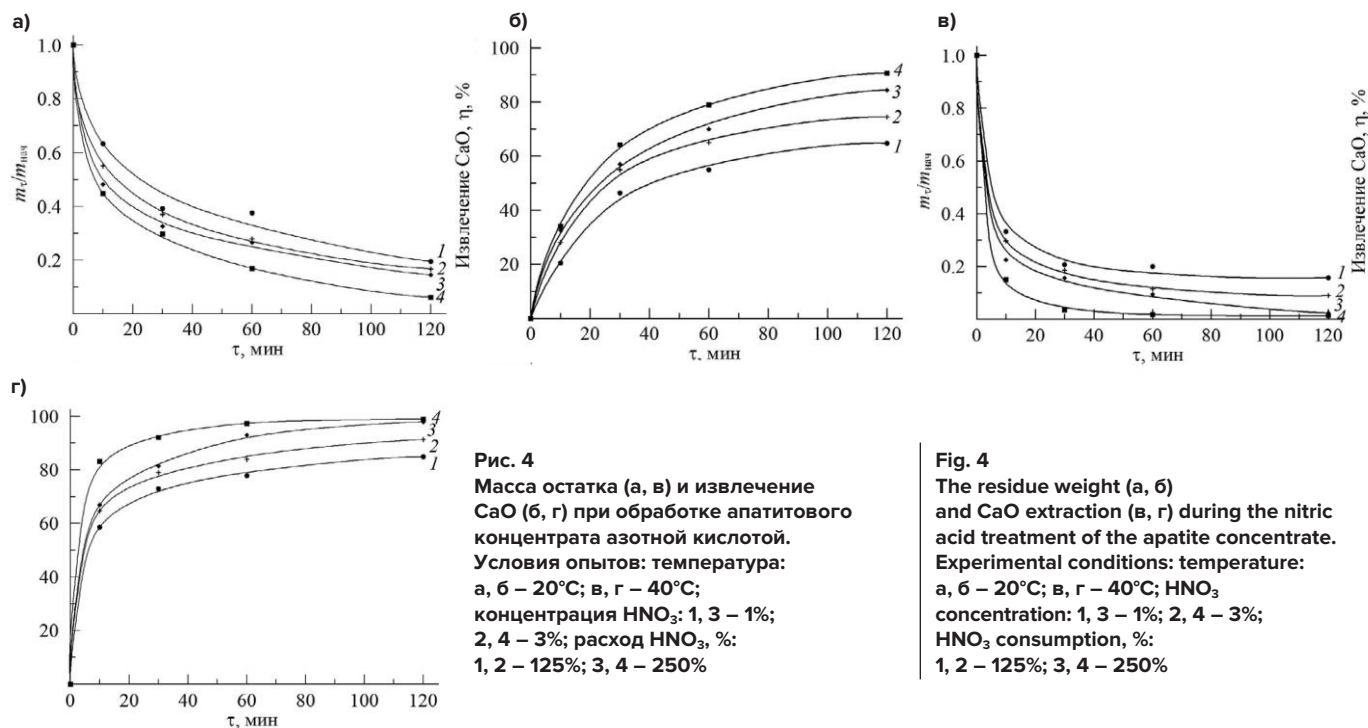


Рис. 4
 Масса остатка (а, в) и извлечение CaO (б, г) при обработке апатитового концентрата азотной кислотой.
 Условия опытов: температура: а, б – 20°C; в, г – 40°C; концентрация HNO₃: 1, 3 – 1%; 2, 4 – 3%; расход HNO₃, %: 1, 2 – 125%; 3, 4 – 250%

Fig. 4
 The residue weight (а, в) and CaO extraction (б, г) during the nitric acid treatment of the apatite concentrate.
 Experimental conditions: temperature: а, б – 20°C; в, г – 40°C; HNO₃ concentration: 1, 3 – 1%; 2, 4 – 3%; HNO₃ consumption, %: 1, 2 – 125%; 3, 4 – 250%

цесса. Так, при увеличении концентрации HNO₃ с 1 до 3% (в 3 раза) при расходе HNO₃ 125% и температуре 20°C максимальные потеря массы и извлечение CaO увеличиваются с 80,4 до 83,2% и с 64,8 до 74,4% соответственно (табл. 3, №1, 2), в то время как увеличение расхода HNO₃ со 125 до 250% (в 2 раза) при одинаковых концентрации HNO₃ (1%) и температуре (20°C) приводит к повышению соответствующих показателей с 80,4 до 85,5% и с 64,8 до 84,4% соответственно (табл. 2, №1, 3); повышение температуры с 20 до 40°C при одинаковых концентрации HNO₃ (1%) и ее расходе (125%) приводит к повышению соответствующих показателей с 80,4 до 84,3% и с 64,8 до 77,8% соответственно (табл. 2, №1, 5).

Из представленных данных также видно, что повышение температуры процесса с 20 до 40 °C приводит к существенному увеличению скорости процесса, в результате чего в течение первых 60 мин как потеря массы АК, так и извлече-

Таблица 2
 Максимальные потеря массы (Δm_{max}) и извлечение CaO (η_{max}) при обработке апатитового концентрата азотной кислотой при различных условиях (τ = 120 мин)

Table 2
 The maximum weight loss (Δm_{max}) and CaO extraction (η_{max}) during the nitric acid treatment of the of apatite concentrate under various conditions (τ = 120 min.)

№	t, °C	Концентрация HNO ₃ , %	Расход HNO ₃ , %	Δm _{max} , %	η _{max} , %
1	20	1	125	80,4	64,8
2		3	125	83,2	74,4
3		1	250	85,5	84,4
4		3	250	93,8	90,7
5	40	1	125	84,3	77,8
6		3	125	91,1	84,0
7		1	250	97,7	92,0
8		3	250	98,7	97,4

Таблица 3
 Результаты экспериментов по регенерации фильтр-ячейки

Table 3
 Results of experiments on the filter cell regeneration

№ опыта	t _p , °C	τ _p , час	C _p , %	№ регенерации	η, %	№ опыта	t _p , °C	τ _p , час	C _p , %	№ регенерации	η, %		
1	20	1	0,5	1	67,4	19	40	1	1,0	1	87,6		
2				2	62,3	20				2	85,1		
3				3	58,8	21				3	83,2		
4				1	78,1	22				1	97,2		
5				2	74,2	23				2	95,7		
6				3	70,8	24				3	96,7		
7		2	1,0	1,0	1	88,4		25	2	2,0	2,0	1	98,6
8					2	85,6		26				2	98,4
9					3	83,8		27				3	98,1
10					1	76,2		28				1	89,8
11					2	71,3		29				2	87,1
12					3	67,5		30				3	85,2
13		2	1,0	1,0	1	82,2		31	2	1,0	1,0	1	97,7
14					2	78,5		32				2	96,1
15					3	75,0		33				3	97,1
16					1	91,2		34				1	99,1
17					2	88,7		35				2	98,7
18					3	86,7		36				3	98,4

ние СаО достигают практически максимального значения, увеличиваясь всего на 1–2% при увеличении продолжительности процесса разложения до 120 мин.

В табл. 3 представлены результаты исследований по регенерации керамической фильтр-ячейки.

Анализ приведенных данных позволил констатировать следующее:

1. Степень регенерации фильтр-ячейки при постоянных значениях концентрации HNO_3 C_p , времени контакта τ_p и температуры процесса t_p снижается от цикла к циклу, что, вероятно, связано как с накоплением в порах фильтр-ячейки мелкодисперсных труднорастворимых примесей (минералов) и, соответственно, забивкой пор, так и неравномерностью потоков промывной кислоты при её промывке (регенерации), вызванной как вышеупомянутой причиной, так и, возможно, неравномерной пористостью самого материала фильтр-ячейки.

2. Влияние времени регенерации (в выбранном диапазоне) менее существенно, при этом влияние этого параметра снижается с увеличением как концентрации кислоты, так и температуры процесса. Так, увеличение τ_p с 1 до 2 ч приводит:

– при концентрации HNO_3 $C_p = 0,5\%$ и температуре процесса $t_p = 20^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 67,4 до 76,2 ($\Delta\eta = 8,8\%$) (оп. №№ 1 и 10 соответственно);

– при концентрации HNO_3 $C_p = 2\%$ и температуре процесса $t_p = 40^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 98,1 до 98,4 ($\Delta\eta = 0,3\%$) (оп. №№ 27 и 36 соответственно).

3. Заметное влияние на степень регенерации фильтр-ячейки оказывает температура процесса. Так, увеличение температуры процесса с 20 до 40°C при постоянных значениях C_p и τ_p приводит к увеличению степени регенерации от 67,4 до 87,6% ($\Delta\eta = 20,2\%$) (оп. №№ 1 и 19 соответственно); от 78,1 до 97,2% ($\Delta\eta = 19,1\%$) (оп. №№ 4 и 22 соответственно) и от 88,4 до 98,6% ($\Delta\eta = 10,2\%$) (оп. №№ 7 и 25 соответственно).

4. Существенное влияние на степень регенерации фильтр-ячейки оказывает также и концентрация промывной кислоты, которое, однако, снижается с увеличением как времени контакта, так и температуры процесса. Так, увеличение концентрации HNO_3 с 0,5 до 2% приводит:

– при времени контакта $\tau_p = 1$ ч и температуре процесса $t_p = 20^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 67,4 до 88,4 ($\Delta\eta = 21,0\%$) (оп. №№ 1 и 7 соответственно);

– при времени контакта $\tau_p = 2$ ч и температуре процесса $t_p = 20^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 76,2 до 91,2 ($\Delta\eta = 15,0\%$) (оп. №№ 10 и 16 соответственно);

– при времени контакта $\tau_p = 1$ ч и температуре процесса $t_p = 40^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 87,6 до 98,6 ($\Delta\eta = 11,0\%$) (оп. №№ 19 и 25 соответственно);

– при времени контакта $\tau_p = 2$ ч и температуре процесса $t_p = 40^\circ\text{C}$ к повышению степени регенерации от 89,8 до 99,1 ($\Delta\eta = 9,3\%$) (оп. №№ 28 и 34 соответственно).

Заключение

Исследовано влияние параметров азотнокислотной обработки апатитового концентрата (температура и продолжительность процесса, концентрация и расход HNO_3) на степень его растворения. Установлено, что температура процесса оказывает наибольшее влияние на степень разложения апатитового концентрата при одинаковых значениях концентрации и расхода азотной кислоты. Рекомендованы оптимальные условия проведения процесса регенерации керамического вакуум-фильтра после загрязнения его в процессе фильтрации пульпы апатитового концентрата минеральными частицами: концентрация HNO_3 – не менее 1%; продолжительность регенерации – до 2 ч при температуре 20°C ; не менее 1 ч – при температуре 40°C .

Список литературы / References

1. Авдохин В.М. *Основы обогащения полезных ископаемых*. М.: Московская типография; 2006. Т. 1. 416 с.
2. Саламатов В.И., Головачёв С.Н., Горнов Ю.Н. Жизненный цикл фильтрующих перегородок. *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2016;(2):88–95.
Salamatov V.I., Golovachev S.N., Gornov Yu.N. Life cycle of filter membranes. *Proceedings of Siberian Department of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2016;(2):88–95. (In Russ.)
3. Саламатов В.И., Зайдес С.А., Берегова Г.М. Технико-экономические преимущества синтетических тканей при обезвоживании технических суспензий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2010;(7):160–165.
Salamatov V.I., Zaydes S.A., Beregova G.M. Technical and economic benefits of synthetic fabrics under the dewatering of technical suspensions. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2010;(7):160–165. (In Russ.)
4. Huttunen M., Nygren L., Kinnarinen T., Ekberg B., Lindh T., Karvonen V. Real-time monitoring of the moisture content of filter cakes in vacuum filters by a novel soft sensor. *Separation and Purification Technology*. 2019;223:282–291. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.091>
5. Красный А.Б., Круглов А.В., Зимбовский И.Г., Дмитракова У.В., Юшина Т.И., Чылбак-Оол Е.Д. Эффективное обезвоживание суспензий с содержанием твердой фазы от 1 до 30% на динамических фильтрах-сгустителях и промышленных фильтрах. *Химическая промышленность сегодня*. 2021;(3):36–43.
Krasny A.B., Kruglov A.V., Zimbovsky I.G., Dmitrakova U.V., Ushina T.I., Chylbak-Ool E.D. Combined intensive dewatering technology for solutions with initial solids concentrations from 1 to 30% using dynamic filter thickeners and industrial filters. *Chemical Industry Developments*. 2021;(3):36–43. (In Russ.)
6. Серафимова Л.И., Науменко В.Г. Особенности обезвоживания тонкодисперсных флотационных угольных концентратов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):131–141. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-8-0-131-141>
Serafimova L.I., Naumenko V.G. Features of dehydration of finely dispersed coal flotation concentrates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):131–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-8-0-131-141>

7. Стовпенко А.С., Нарижных В.Ю., Лозовая С.Ю. Анализ работы керамических дисковых вакуум фильтров. *Международный студенческий научный вестник*. 2015;(3-1):81–85.
Stovpenko A.S., Narizhnykh V.Yu., Lozovaya S.Yu. Analysis of the operation of ceramic disc vacuum filters. *Mezhdunarodnyi Studencheskii Nauchnyi Vestnik*. 2015;(3-1):81–85. (In Russ.)
8. Roy S. Recent developments in processing techniques and morphologies of bulk macroporous ceramics for multifunctional applications. *Materials Today Communications*. 2024;38:107752. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107752>
9. Красный Б.Л., Бондарь В.В. Состояние и перспективы применения дисковых вакуум-фильтров с керамическими фильтрующими элементами в технологии обезвоживания горно-обогатительных производств. *Обогащение руд*. 2007;(2):39–43.
Krasny B.L., Bondar V.V. The status and prospects of application of disk vacuum filters with ceramic filtering elements in dewatering technologies at mining-and-processing facilities. *Obogashchenie Rud*. 2007;(2):39–43. (In Russ.)
10. 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):52–56. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/2039/article/34196/> (дата обращения: 07.03.2026).
Dmitrakova U.V., Kruglov A.V., Yushina T.I., Chylbak-Ool E.D. Filtering equipment application practice at Russian enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2021;(4):52–56. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2039/article/34196/> (accessed: 07.03.2026).
11. Красный Б.Л. Научно-технический центр специальной керамики «Бакор» – поддержка фондов определила наше развитие. *Инновации*. 2009;(S2):61–63.
Krasny B.L. Scientific-technical center of special ceramic “Bacor” – facility support identified our development. *Innovations*. 2009;(S2):61–63. (In Russ.)
12. Höfgen E., Kühne S., Peuker U.A., Stickland A.D. A comparison of filtration characterisation devices for compressible suspensions using conventional filtration theory and compressional rheology. *Powder Technology*. 2019;346:49–56. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.056>
13. 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):4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.11.01>
Krasnyi B.L., Zimbovskiy I.G., Dmitrakova U.V., Chylbak-ool E.D. Chemical method of restoring the filtering ability of ceramic filter elements. *Chernye Metally*. 2021;(11):4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2021.11.01>
14. Salmimies R., Kallas J., Ekberg B., Görres G., Andreassen J.-P., Beck R., Häkkinen A. The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;119:21–26. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.006>

Информация об авторах

Герасимова Лидия Георгиевна – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7609-4651>; e-mail: l.gerasimova@ksc.ru

Майоров Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>; e-mail: d.maiorov@ksc.ru

Адамов Евгений Александрович – главный специалист, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: EAAdamov@phosagro.ru

Information about the authors

Lidiya G. Gerasimova – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Tananaev Institute of Chemistry, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7609-4651>; e-mail: l.gerasimova@ksc.ru

Dmitriy V. Maiorov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Tananaev Institute of Chemistry, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>; e-mail: d.maiorov@ksc.ru

Evgeniy A. Adamov – Senior Specialist, Apatit JSC, Kirovsk branch, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: EAAdamov@phosagro.ru

Article info

Received: 27.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 14.04.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 27.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 14.04.2026