

УДК 622.7

**ПРИМЕНЕНИЕ ФЛОТАЦИИ И МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОНЦЕНТРАТА ПОЛЕВОГО ШПАТА**

М. М. Ахмед, Г. А. Ибрагим, А. М. Е. Ризк, Н. А. Махмуд

*Асьютский университет,
E-mail: nour.ashraf@aun.edu.eg, г. Асьют, Египет*

Исследовано влияние эксплуатационных параметров — напряженности магнитного поля и скорости вращения магнитного вала с целью получения высококачественного концентрата, удовлетворяющего требованиям для промышленного использования. Применялся высокоинтенсивный магнитный сепаратор с индукционным валком МН(13)111-5. Наилучшие результаты выявлены при напряженности магнитного поля 1.66 Тл и скорости вращения вала 24 об./мин. В ходе испытаний получен концентрат полевого шпата, содержащий 0.16 % Fe₂O₃, 0.01 % TiO₂ и 10.31 % щелочных минералов K₂O + Na₂O с массовой долей извлечения ~ 69.24 %, отвечающий требованиям производства белой глазури и керамики.

Полевой шпат, железо, титан, высокоинтенсивный магнитный сепаратор, промышленное использование

DOI: 10.15372/FTPRPI20230614

Различные виды полевого шпата составляют ~ 60 % земной коры [1, 2]. Они представляют собой алюмосиликаты с разным содержанием калия, натрия и кальция. Кварц — распространенный минерал, находящийся в связанном состоянии в полевых шпатах. Глины, слюдяные минералы (биотит, мусковит), рутил, оксиды железа и железосодержащие первичные силикаты (гранат, турмалин, роговая обманка) считаются сопутствующими минералами, содержащимися в полевошпатовом сырье [3, 4].

Полевой шпат используется в разных отраслях промышленности, включая производство стекла и керамики. Это второй по важности ингредиент в керамической промышленности после глины. При производстве стекла полевой шпат выполняет функцию флюса для образования стеклообразной фазы при низких температурах. Он также применяется в качестве наполнителя в полимерах, бумаге, красках, пластмассах, резине и клеях [1, 5–7]. Красящие примеси, такие как железо и титан, снижают качество полевого шпата, поэтому их содержание должно быть снижено, чтобы сырье соответствовало требованиям промышленности. При получении концентрата полевого шпата применяются следующие методы: гравитационное обогащение; флотация; магнитная сепарация; выщелачивание [1, 7].

Необходимый состав полевого шпата для промышленного использования достигается методом концентрирования, включающего магнитную сепарацию и флотацию [7–10]. Обратная флотация — традиционный метод обогащения для удаления красящих примесей и сепарации кварца от полевого шпата [7, 10, 11]. В процессе флотации используется большое количество серной кислоты, негативно влияющей на окружающую среду. В [10] для удаления граната, биотита и мусковита, основных носителей Fe, применялся высокоинтенсивный магнитный сепаратор для мокрого обогащения. Он способен успешно отделять железосодержащие материалы в требуемых объемах, не нанося существенного вреда окружающей среде.

Сухая высокоинтенсивная магнитная сепарация — экологически безопасный метод из-за отсутствия термической сушки. Ее преимущества — компактность конструкции, высокая напряженность поля и низкое энергопотребление сепарирующей установки [12, 13]. В [14] исследовано применение высокоинтенсивного магнитного сепаратора для повышения качества концентрата полевого шпата из Египта, полученного в результате флотации при оптимальных условиях. Для удаления красящих примесей использовался магнитный сепаратор Dings с поперечной лентой при разных напряженностях магнитного поля и скорости подачи материала. Установлено, что значительная доля красящих примесей удалялась при увеличении напряженности магнитного поля. Увеличение напряженности магнитного поля позволило повысить удаление оксида титана с 46 до 95 % и оксида железа — с 23 до 88 %. Содержание оксида титана снизилось с 0.280 до 0.022 %, оксида железа — с 1.53 до 0.25 %. Концентрат полевого шпата с такими показателями содержания примесей соответствует требованиям для производства тонкой керамики и высококачественного стекла.

Цель настоящей работы — определение возможности повышения качества полевошпатового сырья из района Вади-Зириб после флотационного обогащения и изучение влияния напряженности магнитного поля и скорости вращения магнитного вала на снижение красящих примесей с помощью высокоинтенсивного магнитного сепаратора МН(13)111-5 для сухого обогащения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы полевого шпата получены из района Вади-Зириб, расположенного в Аравийской пустыне (Египет), и содержали калиевый полевой шпат, кварц, включения мусковита, биотита и незначительное количество редких непрозрачных минералов [4]. Согласно микроскопическому анализу, полевошпатовое сырье полнокристаллическое, гипидиоморфное с равнотекстурой [15]. На всех участках срастания калиевого полевого шпата с кварцем создают характерную визуальную текстуру. Кварц — один из основных минеральных компонентов, входящих в состав сырья. В калиевом полевошпате и плагиоклазе обнаружены рассеянные мелкие включения мусковита, частично преобразованные в хлорит и оксиды железа. Мафические минералы представлены мусковитом и биотитом в следовых количествах.

Ниже представлен химический состав исходных образцов полевошпатового сырья, определенный методом рентгеновской флуоресценции, %:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Примеси	Следовые элементы
73.60	14.22	0.06	0.71	4.34	4.74	0.43	0.73	1.01	0.16

Методом рентгеновской дифракции установлено, что первичные минералы в полевошпатовом сырье включают кварц (38.2 %), альбит (35.5 %), микроклин (25.0 %), а слюдяные минералы составляют вторичные минералы (1.3 %).

На рис. 1 представлен высокоинтенсивный магнитный сепаратор МН(13)111-5 для сухого магнитного обогащения, используемый для удаления титана и железа из полевошпатового концентрата, полученного в результате флотации при оптимальных условиях. Сепаратор оснащен емкостью из нержавеющей стали для скоростной подачи материала, регулируемой виброусилителем. Скорость вращения вала изменялась в диапазоне 0–300 об./мин. Валок приводится электродвигателем постоянного тока мощностью 0.25 л. с. Сепарирующий валок диаметром 127 мм и шириной 50 мм изготовлен из слоистых магнитных и немагнитных материалов. Сепаратор способен работать с сырьем с насыпной плотностью 1600 кг/м³ при производительности 100 кг/ч и предназначен для работы от однофазного и переменного тока. Сила тока должна быть достаточной для наведения магнитного поля в контуре с напряженностью 1.96 Тл.



Рис. 1. Высокоинтенсивный магнитный сепаратор МН(13)111-5

Перед магнитной сепарацией исходная руда подвергалась дроблению и измельчению до крупности – 250 + 38 мкм, оттирке, обесшламливанию и флотации по методике [4]. На рис. 2 представлена блок-схема получения концентрата полевого шпата. Разделение кварца и полевого шпата выполнялось флотацией при следующих условиях: расход катионного собирателя — четвертичной аммониевой соли 582 г/т; расход фторводородной кислоты 2000 г/т; рН 2.5; скорость вращения смесителя 1200 об./мин.

Ниже представлен химический состав концентрата полевого шпата после флотации (материала для магнитной сепарации), %:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Примеси	Следовые элементы
69.04	17.34	0.04	0.40	5.26	6.26	0.17	0.69	0.66	0.14

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевошпатовый концентрат, полученный в результате флотации при оптимальных условиях, подвергался сухой магнитной сепарации для удаления магнитных примесей (железа и титана). В рамках настоящей работы изучено влияние скорости вращения вала и напряженности магнитного поля на удаление магнитных примесей из концентрата полевого шпата.

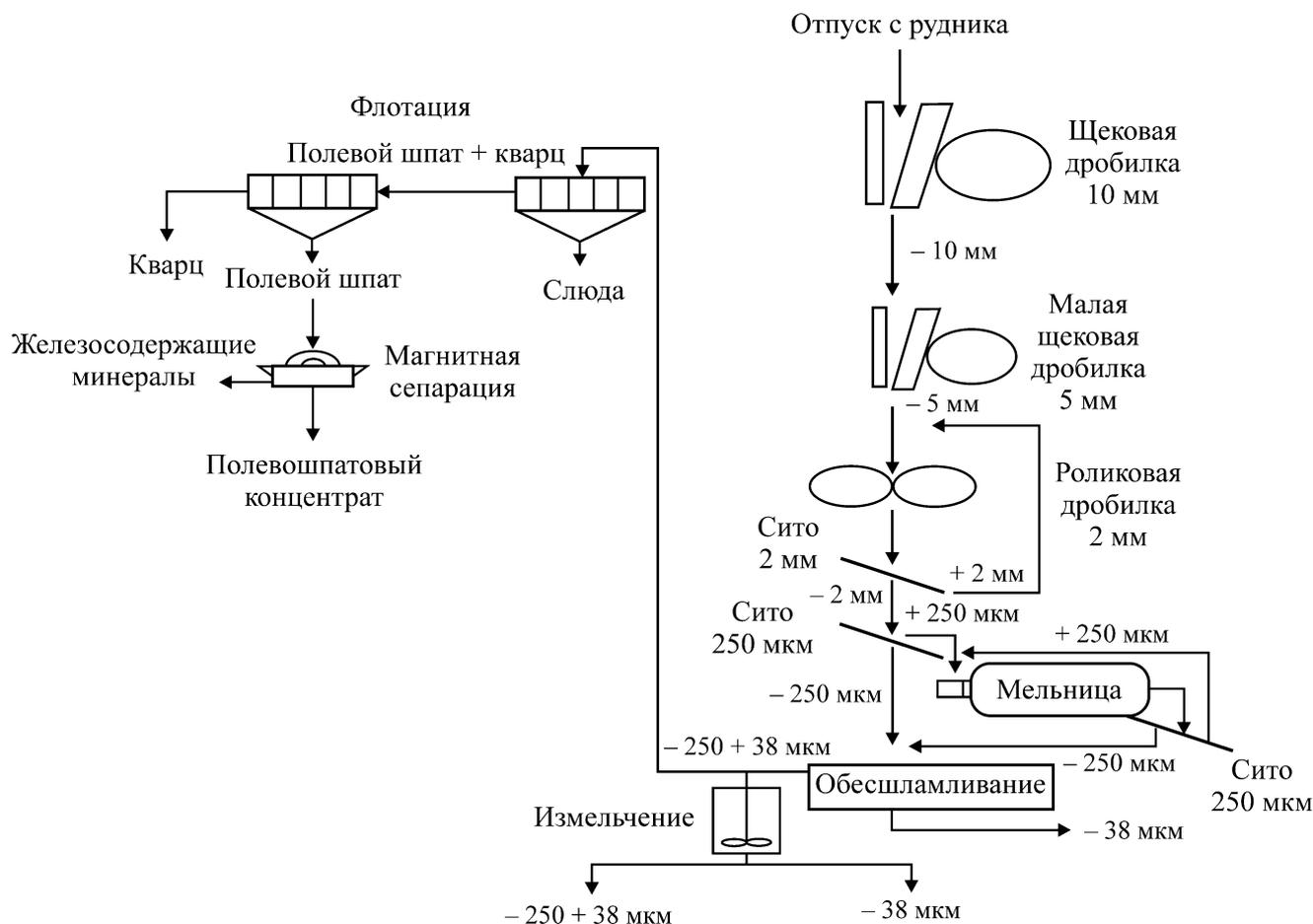


Рис. 2. Схема экспериментальных исследований для получения концентрата полевого шпата

В табл. 1 показано влияние изменения напряженности магнитного поля на эффективность и извлечение трех фракций (магнитной, немагнитной, промпродуктовой), полученных в результате магнитной сепарации. Влияние напряженности магнитного поля изучалось при 1.07, 1.58, 1.66 и 1.96 Тл, скорость вала поддерживалась постоянной (24 об./мин). Воздушный зазор (2 мм), размер частиц и скорость подачи не изменялись на протяжении испытаний.

Повышение напряженности магнитного поля с 1.07 до 1.96 Тл привело к увеличению магнитной фракции с 3.75 до 7.14 %, а сопоставимая доля извлечения Fe_2O_3 выросла с 35.00 % при 1.07 Тл до 65.18 % при 1.96 Тл. С увеличением напряженности поля извлечение TiO_2 и его содержание увеличились. Согласно [16], при низких напряженностях магнитного поля частицы, богатые железом, вытеснялись на валок сепаратора, а захваченные частицы оставались с промпродуктовой и немагнитной фракциями. Из-за неполного отделения частиц полевого шпата от слюды увеличение напряженности магнитного поля приводит к притяжению средних частиц (биотит). Это подтверждается извлечением и сортировкой Fe_2O_3 при разных напряженностях поля. С повышением напряженности магнитного поля от 1.07 до 1.96 Тл в магнитной фракции увеличилось содержание SiO_2 с 0.12 % при извлечении 0.01 до 37.70 % при извлечении 3.90 %; содержание Al_2O_3 уменьшилось с 35.96 % при извлечении 7.78 % до 21.02 % при извлечении 8.66 %.

ТАБЛИЦА 1. Влияние напряженности магнитного поля на содержание и долю извлечения составляющих полевошпатового концентрата в разных фракциях, %

Напряжение магнитного поля, Тл	Фракция	Весовая доля	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	CaO	MgO
Содержание									
1.07	Магнитная	3.75	0.12	35.96	3.73	0.23	49.46	4.55	1.90
	Немагнитная	71.25	71.39	16.89	0.20	0.03	10.19	0.55	0.10
	Промпродуктовая	25.00	72.68	15.83	0.47	0.04	9.62	0.51	0.11
1.58	Магнитная	5.15	18.74	30.51	3.68	0.36	40.30	3.87	1.37
	Немагнитная	69.28	71.24	17.05	0.16	0.02	10.14	0.52	0.11
	Промпродуктовая	25.57	73.22	15.47	0.39	0.03	9.46	0.51	0.09
1.66	Магнитная	5.20	21.61	27.75	3.65	0.49	37.82	3.84	1.76
	Немагнитная	69.24	71.15	17.12	0.16	0.01	10.31	0.52	0.08
	Промпродуктовая	25.56	72.97	15.82	0.39	0.03	9.45	0.51	0.09
1.96	Магнитная	7.14	37.70	21.02	3.65	0.43	31.20	3.29	2.02
	Немагнитная	69.05	71.53	17.07	0.15	0.01	9.97	0.49	0.01
	Промпродуктовая	23.81	71.22	17.02	0.15	0.01	10.11	0.49	0.08
Извлечение									
1.07	Магнитная	—	0.01	7.78	35.00	21.56	16.10	24.73	41.91
	Немагнитная	—	73.68	69.40	35.63	53.44	63.02	56.79	41.19
	Промпродуктовая	—	26.32	22.82	29.38	22.82	20.88	18.48	16.18
1.58	Магнитная	—	1.40	9.07	47.36	46.19	18.03	28.89	41.64
	Немагнитная	—	71.49	68.12	27.71	34.64	60.98	52.21	44.83
	Промпродуктовая	—	27.11	22.81	24.93	19.18	21.00	18.90	13.54
1.66	Магнитная	—	1.63	8.32	47.38	63.52	17.10	28.93	53.88
	Немагнитная	—	71.35	68.36	27.69	17.31	61.97	52.18	32.58
	Промпродуктовая	—	27.02	23.32	24.93	19.17	20.97	18.90	13.53
1.96	Магнитная	—	3.90	8.66	65.18	76.79	19.35	34.06	84.73
	Немагнитная	—	71.54	67.97	25.89	17.26	59.76	49.03	4.06
	Промпродуктовая	—	24.56	23.37	8.93	5.95	20.90	16.91	11.20

С ростом напряженности магнитного поля процентное содержание CaO в магнитной фракции уменьшалось, извлечение увеличивалось, а содержание K₂O и Na₂O в магнитной фракции снижалось. Повышение напряженности магнитного поля позволяет увеличить долю извлечения магнитной фракции и содержание железа. Однако содержание Fe снижалось из-за притяжения промежуточных частиц полевого шпата, обнаруженных по причине неполного отделения частиц от слюдяного (биотит) и железистого сырья.

Выход промпродуктовой фракции увеличивался при повышении напряженности магнитного поля до 1.58 Тл, при превышении этого значения — уменьшался (табл. 1). Рост напряженности магнитного поля привел к снижению содержания Fe в промпродуктовой фракции с 0.47 % при извлечении 29.38 % до 0.15 % при извлечении 8.93 % и снижению содержания TiO₂ с 0.04 % при извлечении 22.82 % до 0.01 % при извлечении 5.95 %. Содержание SiO₂ в пром-

продуктовой фракции сначала увеличилось с 72.68 % при извлечении 26.32 % и напряженности 1.07 Тл до 73.22 % при извлечении 27.11 % и напряженности 1.58 Тл, затем снизилось до 71.22 % при извлечении 24.56 %. Содержание Al_2O_3 снизилось с 15.83 % при извлечении 22.82 % и напряженности 1.07 Тл до 17.02 % при извлечении 23.37 % и напряженности 1.96 Тл. Совокупное содержание щелочи $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ увеличилось до 10.11 % при извлечении 20.90 % и напряженности 1.96 Тл. Содержание других составляющих в промпродуктовой фракции не изменялось с увеличением напряженности магнитного поля.

На рис. 3 показано влияние напряженности магнитного поля на немагнитную фракцию.

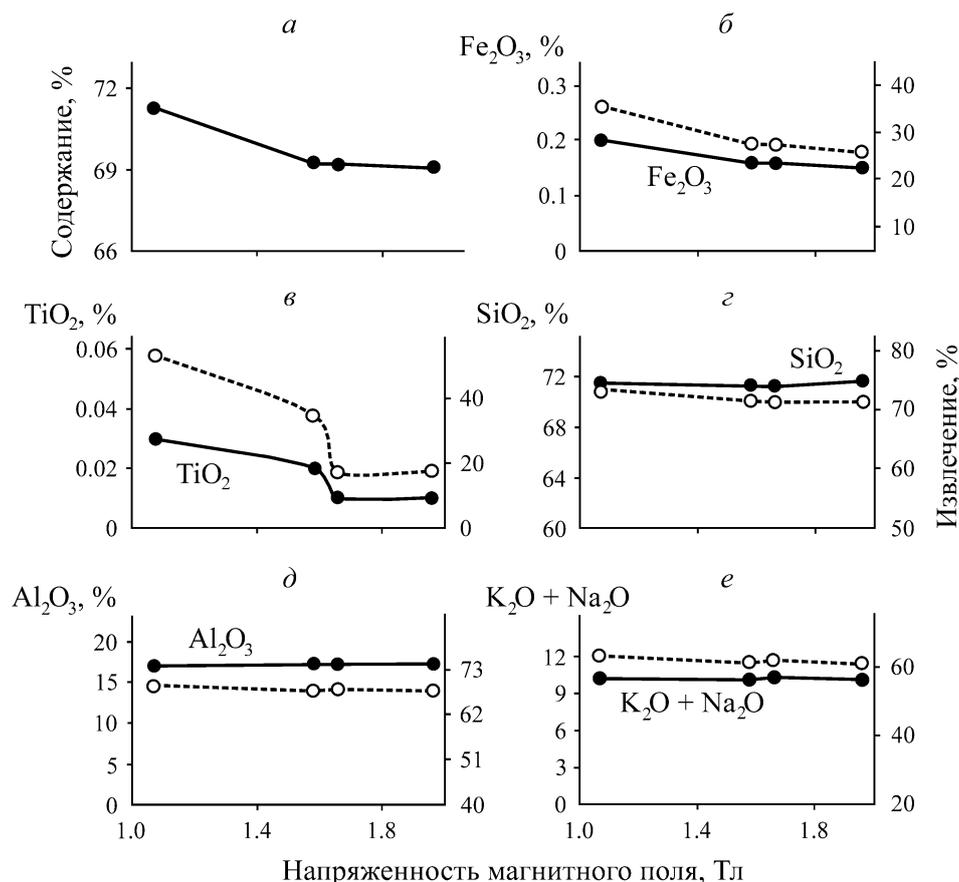


Рис. 3. Влияние напряженности магнитного поля на содержание (сплошная линия) и извлечение (штриховая) основных компонентов в немагнитной фракции

Изменение напряженности магнитного поля влияет на содержание и извлечение компонентов в немагнитной фракции полевого шпата. Доля извлечения уменьшилась с 71.25 % при 1.07 Тл до 69.05 % при 1.96 Тл (рис. 3а). Увеличение напряженности магнитного поля влияет на содержание и извлечение Fe_2O_3 в немагнитной фракции (рис. 3б). При 1.07 Тл содержание Fe_2O_3 составляло 0.20 %, извлечение 35.63 %. При 1.96 Тл содержание снизилось до 0.15 %, извлечение определено 25.89 %. Содержание и доля извлечения TiO_2 демонстрируют аналогичные Fe изменения (рис. 3в). В немагнитной фракции содержание TiO_2 снизилось с 0.03 % при извлечении 53.44 % и напряженности 1.07 Тл до 0.01 % при извлечении 17.31 % и напряженности 1.66 Тл. С достижением напряженности магнитного поля 1.96 Тл содержание TiO_2 не изменилось, однако доля извлечения снизилась до 17.26 %.

Влияние повышения напряженности магнитного поля на содержание и долю извлечения SiO_2 , Al_2O_3 и $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ в немагнитной фракции приведено на рис. 3з–е. Показано, что содержание и доля извлечения этих составляющих значительно не изменялись. Содержание SiO_2 снизилось с 71.39 % при извлечении 73.68 % и напряженности 1.07 Тл до 71.15 % при извлечении 71.35 % и напряженности 1.66 Тл, затем незначительно увеличилось до 71.53 % при извлечении 71.54 % и напряженности 1.96 Тл. Содержание Al_2O_3 выросло с 16.89 % при извлечении 69.40 % и напряженности 1.07 Тл до 17.12 % при извлечении 68.36 % и напряженности 1.66 Тл. Определено, что содержание и извлечение снизились до 17.07 и 67.97 % при напряженности 1.96 Тл. Содержание $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ снизилось с 10.19 % при извлечении 63.02 % и напряженности 1.07 Тл до 9.97 % при извлечении 59.76 % и напряженности 1.96 Тл. Доля удаления Fe_2O_3 и TiO_2 из немагнитной фракции зависит от напряженности магнитного поля. Удаление Fe_2O_3 увеличилось с 64.37 % при 1.07 Тл до 74.11 % при 1.96 Тл; TiO_2 с 46.56 % при 1.07 Тл до 82.74 % при 1.96 Тл (рис. 4). Согласно [17] и результатам настоящего исследования, при повышении напряженности магнитного поля увеличивается притяжение магнитных частиц к валку и, соответственно, чистота немагнитной фракции.

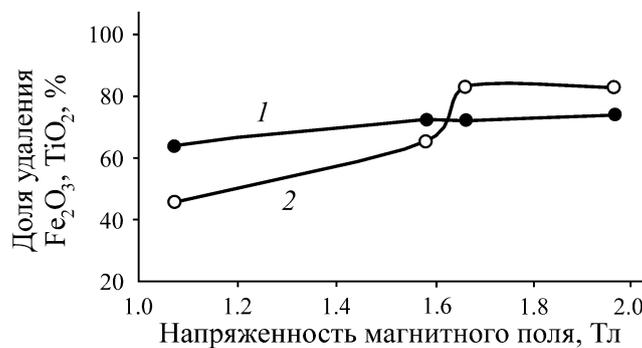


Рис. 4. Влияние напряженности магнитного поля на удаление Fe_2O_3 (1) и TiO_2 (2) из немагнитной фракции

Свойства полевошпатового концентрата, полученного при 1.66 Тл, подходят для использования в различных отраслях промышленности, а именно для производства белой и небелой глазури, керамического сырца, листового и тарного стекла [4, 18].

Влияние изменения скорости вращения магнитного валка на эффективность сепарации магнитных и немагнитных фракций изучено при скорости вращения 24, 75 и 125 об./мин. Напряженность магнитного поля поддерживалась постоянной (1.96 Тл).

В табл. 2 показано влияние скорости вращения валка на содержание и долю извлечения составляющих полевошпатового концентрата в магнитной и немагнитной фракциях. Увеличение скорости вращения валка снижает выход магнитной фракции с 7.14 % при 24 об./мин до 3.70 % при 125 об./мин. С увеличением скорости вращения валка содержание Fe_2O_3 уменьшилось с 3.65 % при 24 об./мин до 3.08 % при 75 об./мин, затем до 4.04 % при 125 об./мин. Извлечение Fe_2O_3 снизилось с 65.18 % при 24 об./мин до 37.41 % при 125 об./мин. Содержание TiO_2 составляло 0.43 % при извлечении 76.79 % и скорости вращения валка 24 об./мин и увеличилось до 0.56 % при извлечении 51.85 % и скорости 125 об./мин. С увеличением скорости вращения валка до 125 об./мин содержание и извлечение SiO_2 в магнитной фракции снизились: с 37.70

и 3.90 % до 17.04 и 0.91 % соответственно. Содержание и извлечение Al_2O_3 снизились с 21.02 и 8.66 % при 24 об./мин до 20.98 и 4.48 % при 125 об./мин соответственно. С повышением скорости магнитного вала содержание CaO и совокупное содержание K_2O и Na_2O в магнитной фракции незначительно увеличивались, пока скорость вала не достигала 75 об./мин и их доли извлечения снижались. С ростом скорости вала выше 75 об./мин увеличилось содержание CaO и $K_2O + Na_2O$, но снизилась доля их извлечения.

ТАБЛИЦА 2. Влияние скорости вращения магнитного вала на содержание и долю извлечения составляющих полевошпатового концентрата в разных фракциях, %

Скорость вращения вала, об./мин	Фракция	Весовая доля	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	$K_2O + Na_2O$	CaO	MgO
Содержание									
24	Магнитная	7.14	37.70	21.02	3.65	0.43	30.88	3.29	2.02
	Немагнитная	92.86	71.45	17.06	0.15	0.01	10.03	0.49	0.03
75	Магнитная	6.94	37.42	21.01	3.08	0.44	31.35	3.37	2.04
	Немагнитная	93.06	71.40	17.06	0.20	0.01	10.04	0.49	0.03
125	Магнитная	3.70	17.04	20.98	4.04	0.56	49.22	4.07	2.51
	Немагнитная	96.30	71.04	17.20	0.26	0.02	10.07	0.56	0.08
Извлечение									
24	Магнитная	—	3.90	8.66	65.18	76.79	19.14	34.06	84.73
	Немагнитная	—	96.10	91.34	34.82	23.21	80.86	65.94	15.27
75	Магнитная	—	3.76	8.45	53.47	76.74	18.89	33.92	83.58
	Немагнитная	—	96.24	91.55	46.53	23.26	81.11	66.08	16.42
125	Магнитная	—	0.91	4.48	37.41	51.85	15.81	21.85	54.68
	Немагнитная	—	99.09	95.52	62.59	48.15	84.19	78.15	45.32

При увеличении скорости вращения вала притяжение магнитных частиц к нему снижается. В результате извлечение немагнитной фракции выросло с 92.86 % при 24 об./мин до 96.30 % при 125 об./мин (рис. 5а). Содержание Fe_2O_3 в немагнитной фракции увеличилось с 0.15 % при извлечении 34.82 % и скорости вращения вала 24 об./мин до 0.26 % при извлечении 62.59 % и скорости 125 об./мин (рис. 5б). Содержание TiO_2 в немагнитной фракции увеличилось с 0.01 % при извлечении 23.21 % и скорости вала 24 об./мин до 0.02 % при извлечении 48.15 % и скорости 125 об./мин (рис. 5в). На рис. 5г–е показано влияние скорости вращения вала на содержание и долю извлечения SiO_2 , Al_2O_3 , и $K_2O + Na_2O$ в немагнитной фракции. Содержание SiO_2 снизилось с 71.45 % при извлечении 96.10 % и скорости вращения вала 24 об./мин до 71.04 % при извлечении 99.09 % и скорости 125 об./мин. Содержание и извлечение Al_2O_3 увеличились с 17.06 и 91.34 % до 17.20 и 95.52 % при увеличении скорости вращения вала с 25 до 125 об./мин соответственно. С увеличением скорости вращения магнитного вала наблюдается небольшой рост содержания и извлечения CaO , MgO , $K_2O + Na_2O$.

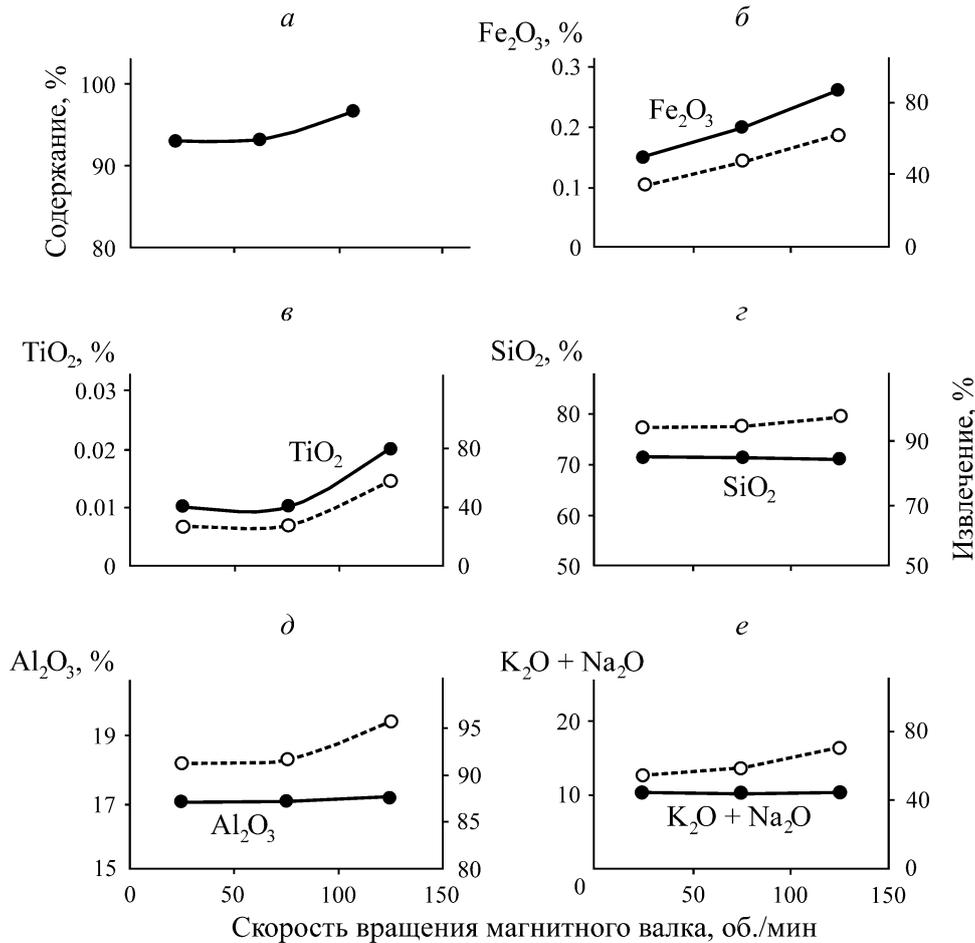


Рис. 5. Влияние скорости вращения магнитного вала на содержание (сплошная линия) и извлечение (штриховая) основных компонентов в немагнитной фракции

Влияние увеличения скорости вращения магнитного вала на долю удаления Fe_2O_3 и TiO_2 из немагнитной фракции при напряженности магнитного поля 1.96 Тл приведено на рис. 6.

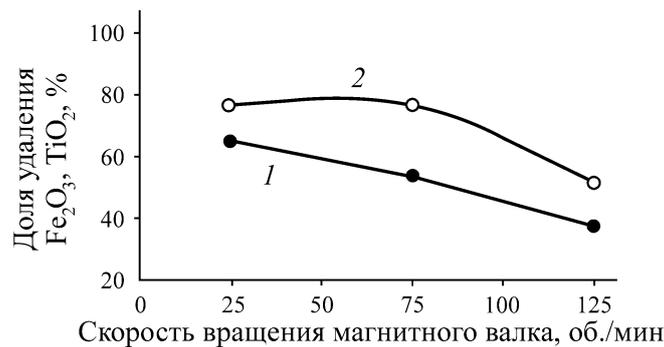


Рис. 6. Влияние скорости вращения магнитного вала на долю удаления Fe_2O_3 (1) и TiO_2 (2) из немагнитной фракции

Видно, что повышение скорости вращения вала снижает долю удаления Fe_2O_3 из немагнитной фракции с 65.18 % при 24 об./мин до 37.41 % при 125 об./мин. Удаление TiO_2 из немагнитной фракции имеет схожий характер с удалением Fe_2O_3 . При повышении скорости враще-

ния валка с 24 до 125 об./мин доля удаления TiO_2 из немагнитной фракции снизилась с 76.79 до 51.85 % соответственно. Представленные результаты позволяют заключить, что при низкой скорости вращения валка магнитное поле способно захватить и удержать частицу, тогда как при высокой скорости частица отклоняется и не захватывается магнитным полем. Содержание других составляющих полевошпатового концентрата в немагнитной фракции изменялось крайне незначительно при увеличении скорости вращения валка.

Результаты испытаний показали, что повышение скорости вращения магнитного валка снижает степень притяжения магнитных и промпродуктовых частиц на магнитный валок, поэтому чистота немагнитной фракции полевошпатового концентрата снижается.

Такое поведение может быть обусловлено повышением центробежной силы, действующей на частицы в противоположную сторону от поверхности валка. Из-за увеличения скорости вращения валка центробежная сила повышается и начинает превосходить другие силы, действующие на частицы (силы магнитного и гравитационного притяжения). При значительной центробежной силе слабые магнитные частицы отцепляются от поверхности валка и попадают в поток немагнитных частиц, снижая чистоту немагнитной фракции [16].

ВЫВОДЫ

В ходе исследования выявлено, что с увеличением напряженности магнитного поля повышается притяжение магнитных частиц к валку и снижается содержание железа в немагнитной фракции. Увеличение скорости вращения валка приводит к снижению притяжения слабых магнитных и промпродуктовых частиц к валку и снижению чистоты немагнитной фракции. В результате магнитной сепарации получен окончательный полевошпатовый концентрат, содержащий 0.16 % Fe_2O_3 , 0.01 % TiO_2 и 10.31 % $K_2O + Na_2O$ при массовой доле извлечения ~ 69.24 % и оптимальных эксплуатационных условиях: напряженности магнитного поля 1.66 Тл, скорости вращения валка 24 об./мин. Получен полевошпатовый концентрат, соответствующий требованиям для производства белой и небелой глазури, керамического сырца, листового и тарного стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moura L. C., André F. P., Miceli H., Neumann R., and Tavares L. M. Manufactured feldspar-quartz sand for glass industry from gneiss quarry rock fines using dry rare-earth magnetic separation, *Miner. Proc. Extractive Metall. Rev.*, 2019, Vol. 40, No. 5. — P. 333–343.
2. Cınar M. and Durgut E. Mineral beneficiation of nepheline syenite with combination of dry magnetic separation and flotation methods, *Physicoch. Problems Miner. Proc.*, 2019, Vol. 55, No. 5.
3. Bayat O., Arslan V., and Cebeci Y. Combined application of different collectors in the floatation concentration of Turkish feldspars, *Miner. Eng.*, 2006, Vol. 19, No. 1. — P. 98–101.
4. Ahmed M., Ibrahim G., Rizk A., and Mahmoud N. Reduce the iron content in Egyptian feldspar ore of Wadi Zirib for industrial applications, *Int. J. Min. Eng. Miner. Process*, 2016, Vol. 5. — P. 25–34.
5. El-TaHER A. Elemental content of feldspar from Eastern Desert, Egypt, determined by INAA and XRF, *Appl. Radiation Isotopes*, 2010, Vol. 68, No. 6. — P. 1185–1188.
6. Zhang Y., Hu Y., Sun N., and Runqing L. Systematic review of feldspar beneficiation and its comprehensive application, *Miner. Eng.*, 2018, Vol. 128. — P. 141–152.
7. Burat F., Kokkilic O., Kangal O., Gurkan V., and Celik M. Quartz-feldspar separation for the glass and ceramics industries, *Min., Metall. Exploration*, 2007, Vol. 24, No. 2. — P. 75–80.

- 8. Mazhari S. A., Hajalilou B., and Bea F.** Evaluation of syenite as feldspar source: Piranshahr pluton, NW of Iran, *Natural Res. Res.*, 2012, Vol. 21, No. 2. — P. 279–283.
- 9. Silva J. C., Ulsen C., Bergerman M. G., and Horta D. G.** Reduction of Fe₂O₃ content of foyaite by flotation and magnetic separation for ceramics production, *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, Vol. 8, No. 5. — P. 4915–4923.
- 10. Saisinchai S., Boonpramote T., and Meechumna P.** Upgrading feldspar by WHIMS and flotation techniques, *Eng. J.*, 2015, Vol. 19, No. 4. — P. 83–92.
- 11. Celik M., Can I., and Eren R.** Removal of titanium impurities from feldspar ores by new flotation collectors, *Miner. Eng.*, 1998, Vol. 11, No. 12. — P. 1201–1208.
- 12. Wills B. A. and Finch J.** *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Butterworth-Heinemann, 2015. — 512 p.
- 13. Tripathy S. K., Murthy Y. R., Singh V., and Suresh N.** Processing of ferruginous chromite ore by dry high-intensity magnetic separation, *Miner. Proc. Extractive Metall. Rev.*, 2016, Vol. 37, No. 3. — P. 196–210.
- 14. El-Rehiem F. and Abd El-Rahman M.** Removal of colouring materials from Egyptian albite ore, *Miner. Proc. Extractive Metall.*, 2008, Vol. 117, No. 3. — P. 171–174.
- 15. Ahmed N. A. M.** Concentration of Egyptian feldspar ore in wadi Zirib for industrial applications, M. Sc, Assiut University, 2018.
- 16. Farghaly M.** Beneficiation process of El-Bahariya iron ore, M. Sc M. Sc, Assiut University, Egypt, 2002.
- 17. Abouzeid A.-Z. M. and Negm A.-T. A.** Characterization and beneficiation of an Egyptian nepheline syenite ore, *Int. J. Mineralogy*, 2014. — 128246.
- 18. Silva A. C., Carolina S. D., Sousa D. N., and Silva E. M. S.** Feldspar production from dimension stone tailings for application in the ceramic industry, *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, Vol. 8, No. 1. — P. 1–7.

*Поступила в редакцию 24/I 2023
После доработки 11/X 2023
Принята к публикации 16/XI 2023*