УДК 622.766.47

DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_114

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АЗОТИРОВАННОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО КОНТАКТА С МИНЕРАЛИЗОВАННОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМОЙ

Г.П. Двойченкова^{1,2}, А.С. Тимофеев¹, Ю.А. Подкаменный^{1,2}

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия, e-mail: dvoigp@mail.ru ² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Мирный, Россия

Аннотация: С учетом результатов предыдущих исследований на данном этапе работ выполнена обработка опытной партии ферросилиция марки DMS 270 в рациональном режиме, характеризующемся следующими параметрами: температура 1000 °C, время выдержки 2 ч, давление азота 1,25 атм, методом его азотирования для последующего применения в опытно-промышленных испытаниях. Разработана и утверждена методика проведения сравнительных испытаний по оценке изменения свойств исходного и азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с оборотной минерализованной водной системой с использованием опытно-промышленной установки тяжелосредной сепарации в схеме обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа. Выполнены опытнопромышленные испытания коррозионной устойчивости изготовленного азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с минерализованной оборотной водой технологического процесса тяжелосредной сепарации. Контроль технологического процесса осуществлялся по параметрам, утвержденным в методике, с отбором суточных проб ферросилиция из рабочей суспензии и хвостов магнитного сепаратора цикла регенерации ферросилициевой суспензии. Выполнен расчет ежедневного изменения количества ферросилиция в рабочем объеме суспензии. Результатами сравнения количественных и качественных показателей процесса опытно-промышленных испытаний, подтвержденными соответствующим актом, установлен факт нарастания суточных потерь немагнитной фракции за период испытаний в количестве 4 и 2,5 кг с использованием ферросилициевой суспензии на основе исходного и азотированного ферросилиция соответственно. Результатами математической обработки установлено, что азотированный ферросилиций обладает высокой коррозионной стойкостью и имеет технические параметры, позволяющие увеличить срок его полезного использования не менее чем в 2,2 раза.

Ключевые слова: водные системы, ферросилиций, азотирование, опытно-промышленные испытания, тяжелосредная сепарация, гранулы, коррозионная устойчивость, агрегативная устойчивость, потери.

Для цитирования: Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А. Результаты опытно-промышленных испытаний коррозионной устойчивости азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с минерализованной водной системой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9. – С. 114–129. DOI: 10.25018/ 0236_1493_2023_9_0_114.

Pilot test data on corrosion resistance of nitrided ferrosilicium in long-term contact with mineralized water

G.P. Dvoichenkova^{1,2}, A.S. Timofeev¹, Yu.A. Podkamenny^{1,2}

 ¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru
² Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract: With regard to the previous research findings, the pilot processing testing of a trial batch of ferrosilicium grade DMS 270 was undertaken in rational conditions at the temperature of 1000 °C, curing time of 2 h, nitrogen pressure of 1.25 atm and using the method of nitration. The comparative experimentation procedure is developed and approved for the assessment of variation in the properties of ordinary and nitrided ferrosilicium in the long-term contact with mineralized recycling water on a pilot plant of float-and-sink separation at concentration factory No. 3 of Mirny Mining and Processing Plant. The pilot tests of corrosion resistance of nitride ferrosilicium in the long-term contact of mineralized recycling water of float-and sink separation were carried out. The process control used the procedural parameters and included daily sampling of ferrosilicium from the working suspension and magnetic separator tailings after ferrosilicium suspension regeneration cycle. The daily change in the amount of ferrosilicium in the active volume of the suspension is evaluated. The comparison of the quantitative and qualitative data of the pilot tests, duly certified, proved an increase in the daily loss of the nonmagnetic fraction in the amount of 4 kg and 2.5 kg over the period of testing the ferrosilicium suspension made of ordinary and nitrided ferrosilicium, respectively. The mathematical treatment of the results shows that nitrided ferrosilicium possesses high corrosion resistance and process parameters which prolong the use life of the product by no less than 2.2 times.

Key words: water-based systems, ferrosilicium, nitration, pilot testing, float-and-sink separation, granules, corrosion resistance, aggregative stability, loss.

For citation: Dvoichenkova G. P., Timofeev A. S., Podkamenny Yu. A. Pilot test data on corrosion resistance of nitrided ferrosilicium in long-term contact with mineralized water. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9):114-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_114.

Введение

Эффективность процесса тяжелосредного обогащения алмазосодержащего сырья обусловлена степенью коррозионной устойчивости ферросилициевой суспензии, гранулы которой подвержены процессам окисления и последующего разрушения в условиях длительного контакта с минерализованными водными системами.

Для современных схем процессов тяжелосредной сепарации (TCC/DMS) при обогащении алмазосодержащего сырья используется достаточно дорогой ферросилиций, что приводит к удорожанию себестоимости извлекаемых алмазов в случае его высоких технологических потерь [1 – 3].

Исследованиями, выполненными в течение ряда лет институтами ИПКОН РАНи«Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», установлено, что основной проблемой для сохранения коррозионной устойчивости ферросилиция с целью снижения его потерь в процессах тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья является окисление ферросилициевых гранул при взаимодействии с коррозионно активными элементами окружающей водно-воздушной среды [4 — 6].

Окисление и разложение гранулированного ферросилиция приводит к увеличению его безвозвратных потерь в процессе регенерации за счет снижения магнитной восприимчивости ферросилициевых частиц [7 — 9]:

 удельная магнитная восприимчивость исходного ферросилиция при напряженности магнитного поля 1000 Э и 1520 Э составляет 0,109 и 0,0899 см³/г соответственно;

 для окисленного образца в этих же условиях магнитная восприимчивость уменьшается почти в 2 раза и составляет 0,049 и 0,042 см³/г соответственно.

Результатами предыдущих исследований [10—12] была установлена необходимость:

 модифицировать свойства жидкой фазы ферросилициевой суспензии до значений, обеспечивающих снижение ее коррозионной активности по отношению к ферросилицию;

 создать защитную оболочку на поверхности ферросилициевых гранул, предупреждающую их разрушение при контакте с активной коррозионной водной средой.

Результаты анализа возможности использования наиболее эффективных методов обеспечения коррозионной устойчивости ферросилиция, предложенных и апробированных институтами ИПКОН РАН, Якутнипроалмаз и НИГП АК «АЛ-РОСА» в условиях ТСС алмазосодержащих кимберлитов, показали:

 невозможность использования химических реагентов для модифицирования свойств используемых водных систем вследствие сложности их доставки, хранения и дополнительного загрязнения технологической воды компонентами используемых веществ;

 повышенный расход электроэнергии в случае использования электрохимических методов кондиционирования водных систем вследствие их большого расхода в технологическом процессе;

 ограничение циклом приготовления суспензии использования химически инертного газа азота вместо воздуха для предупреждения окисления гранул ферросилиция в процессах их перемешивания.

В качестве наиболее приемлемого для использования в условиях тяжелосредной сепарации на алмазоизвлекающих фабриках АК «АЛРОСА» обоснован и апробирован в стендовых условиях метод модифицирования свойств ферросилиция за счет его азотирования с целью создания на поверхности ферросилициевых гранул защитного нитридного слоя, обладающего высокой коррозионной стойкостью в условиях контакта с коррозионно активными водными системами технологического процесса TCC [13-17].

Полученные экспериментальные данные показали возможность снижения на 40 — 50% скорости окисления ферросилициевых гранул и, как следствие, предупреждения разрушения ферросилиция в условиях тяжелосредной сепарации алмазосодержащего материала.

При этом обеспечивается сокращение не менее чем в два раза потерь ферросилиция в технологическом процессе TCC алмазосодержащего материала различного вещественного состава, что послужило основанием для рекомендации метода азотирования ферросилиция к дальнейшей разработке с проведением сравнительных опытно-промышленных испытаний по оценке изменения свойств исходного и азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с оборотной минерализованной водной системой [11, 12]. Цель настоящих исследований заключалась в сравнительной оценке коррозионной устойчивости исходного и азотированного ферросилиция при длительном контакте с минерализованной водной системой в условиях опытнопромышленных испытаний.

Для достижения поставленной цели предложены и решены следующие задачи:

 определены потери исходного и азотированного ферросилиция за период опытно-промышленных испытаний в условиях длительного контакта в динамике с коррозионно-активной минерализованной оборотной водой, используемой в технологическом процессе TCC;

 выполнен сравнительный анализ технологических свойств образцов исходного и азотированного ферросилиция, отобранных в процессе опытно-промышленных испытаний.

Методы и методики исследований

Сравнительные испытания по оценке изменения свойств исходного и азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с оборотной минерализованной водной системой выполнены с использованием опытно-промышленной установки (ТСУ) в цехе обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа (ОФ № 3 МГОКа) специалистами ИПКОН РАН, института «Якутнипроалмаз», Мирнинского ГОКа и ЦИТАК «АЛ-РОСА» в соответствии с утвержденной методикой (№ ТД02-670-02-1290-42/659).

Предметами исследований в настоящих исследованиях были приняты:

 пробы исходного и азотированного ферросилиция в условиях контакта с минерализованной водой;

 хвосты магнитного сепаратора при регенерации ферросилициевой суспензии (немагнитный продукт);

 ферросилициевые суспензии на основе исходного и азотированного ферросилиция и продукты (пробы) ее взаимодействия с минерализованной водой в условиях испытаний;

 минерализованная оборотная вода и жидкая фаза ферросилициевых суспензий в исследуемых условиях.

Контроль технологического процесса осуществлялся по схеме и параметрам, утвержденным в методике.

1. Параметры, фиксируемые непосредственно в процессе опытно-промышленных испытаний [18]:

 уровень суспензии в баке готовой среды (ежесуточно);

 количество потерь ферросилиция в немагнитной фракции магнитного сепаратора (масса сухой накопительной суточной пробы);

 плотность суспензии в баке готовой среды (ежесуточно);

 визуальная оценка степени окисления ферросилиция с фотографией исследуемого образца, фотографирование процесса испытаний (ежесуточно);

 значение pH суспензии методом потенциометрии (ежесуточно);

 седиментационная устойчивость ферросилициевой суспензии в исследуемых условиях, методом подвижной границы (ежесуточно);

 содержание ферросилиция в баке готовой среды. Определяется расчетным методом из объема ферросилициевой суспензии в схеме TCC. Изменение объема ферросилициевой суспензии определяется по изменению уровня суспензии в баке готовой среды (ежесуточно).

Схема испытаний и точки ее опробования представлены на рис. 1.

Согласно разработанной методике, сравнительные испытания выполнены в два этапа длительностью 8 сут каждый:

1. На первом этапе (опыт 1) в качестве утяжелителя ферросилициевой суспензии использован исходный (необработанный) ферросилиций;

2. На втором этапе (опыт 2) в качестве утяжелителя ферросилициевой сус-



Рис. 1. Схема процесса и точки отбора проб Fig. 1. Process scheme and sampling points

пензии использован азотированный ферросилиций (исходный ферросилиций, поверхность гранул которого обработана методом азотирования).

Опыты 1 и 2 проведены в одинаковых условиях, согласно одному из которых начальная загрузка исследуемого ферросилиция составляла 500,25 кг, что обеспечивало плотность ферросилициевой суспензии, соответствующую промышленным условиям (2400 кг/м³).

Процесс взаимодействия исследуемого ферросилиция с минерализованной оборотной водой осуществлялся в непрерывном режиме работы установки без подачи рудного материала и без добавки ферросилиция с непрерывной подпиткой оборотной минерализованной водой. С учетом технических особенностей опытной установки первые тридня испытаний составляли период стабилизации процесса в каждом из этапов испытаний.

Результаты выполненных исследований

Полученные в процессе проведения двух этапов испытаний данные текущего контроля количественных и качественных показателей технологического процесса представлены в таблицах и на соответствующих диаграммах, приведенных ниже.

За период испытаний с использованием в процессе исходного ферросилиция были получены значения количественных параметров процесса, представленные в табл. 1.

В процессе данного этапа испытаний после 3 дней процесса взаимодействия исходного ферросилиция с минерализованной водной системой количество немагнитных зерен ферросилиция в суточной пробе хвостового продукта магнитного сепаратора стабильно увеличивалось, что обусловлено ростом интенсивности процесса окисления ферросилициевых гранул.

Особенности процесса взаимодействия исходного ферросилиция с минерализованной водной системой представлены графически на рис. 2.

Область А на диаграмме рис. 2 характеризует период стабилизации процесса взаимодействия ферросилиция с водной средой. На 3 — 6-е сутки отмечается достаточно стабильный рост содержания немагнитной фракции в суточной пробе хвостов магнитного сепаратора

Таблица 1

Количественные контролируемые параметры и показатели в процессе испытаний исходного ферросилиция Quantitative controlled parameters and indicators in the process of testing the original ferrosilicon

Время, сут	Плотность суспензии, г/см ³		Рассчитан- ный объем	Рассчитанная масса ферро- силиция в схеме ТСУ, кг		Масса немаг- нитной фрак-		
	по плотно- меру	по измере- ниям	суспензии в схеме, м ³	по плотно- меру	по измере- ниям	ции магнитного сепаратора, кг		
0	2,40	2,400	0,305	500,25	500,25	_		
1	2,39	2,372	0,301	490,85	484,38	0,693		
2	2,40	2,430	0,281	461,35	471,24	0,747		
3	2,40	2,357	0,288	472,71	458,08	0,178		
4	2,40	2,410	0,285	468,33	471,67	0,401		
5	2,40	2,400	0,291	476,99	476,99	0,781		
6	2,41	2,393	0,280	462,94	457,47	0,655		
7	2,40	2,410	0,271	445,01	448,19	0,752		
8	2,40	2,403	0,247	406,17	406,90	3,894		
* Взвешиванием 1 дм ³ суспензии.								

(рис. 2, область В); далее на 6 — 8-е сутки происходит увеличение выхода немагнитного продукта, содержащего окисленные зерна ферросилициевых гранул, что обусловлено ростом скорости процесса окисления ферросилиция в условиях взаимодействия с минерализованной водой (рис. 2, область С). На рис. 3 показана диаграмма посуточного изменения в суспензии количества исходного ферросилиция за период испытаний, то есть за время его непрерывного контакта с минерализованной водной системой.

Как видно из представленной диаграммы (см. рис. 3), в условиях экспери-



Рис. 2. Выход немагнитной фракции при испытаниях исходного ферросилиция Fig. 2. Yield of the non-magnetic fraction during testing of the initial ferrosilicon



Рис. 3. Изменение количества ферросилиция (исходного) в суспензии TCC за период испытаний Fig. 3. Change in the amount of ferrosilicon (initial) in the DMS suspension over the test period

мента наблюдается аналогичный характеру кривой выхода немагнитной фракции (см. рис. 2) изменение содержания ферросилиция в суспензии схемы испытаний.

В начале испытаний в первые 3-е суток происходит стабилизация процесса (см. рис. 3, область А). Далее на 3—6-е сутки испытаний наблюдается стабилизация содержания ферросилиция в суспензии (рис. 3, область В), с последующим явно выраженным снижением до конца испытаний (рис. 3, область С). Резкое, почти на 100 кг, снижение ко-

Таблица 2

Количественные контролируемые параметры и показатели процесса испытаний с использованием азотированного ферросилиция

Quantitative controlled parameters and indicators of the testing process using nitrided ferrosilicon

Время, сут	Плотность суспензии, г/см³		Рассчитан- ный объем	Рассчитанная масса ферро- силиция в схеме ТСУ, кг		Масса немаг- нитной фрак-			
	по плотно- меру	по измерени- ям*	суспензии в схеме, м ³	по плотно- меру	по измере- ниям	ции магнитного сепаратора, кг			
0	2,40	2,400	0,353	578,85	578,85	_			
1	2,40	2,373	0,335	549,78	538,98	0,590			
2	2,40	2,397	0,332	544,17	542,88	0,760			
3	2,39	2,383	0,309	504,21	501,79	0,832			
4	2,40	2,400	0,291	477,55	477,55	0,346			
5	2,40	2,403	0,298	489,32	490,49	0,222			
6	2,40	2,410	0,304	499,17	502,73	0,258			
7	2,40	2,403	0,301	494,83	496,01	0,245			
8	2,40	2,385	0,301	494,83	489,53	0,150			
* Взвешиванием 1 дм ³ суспензии.									

личества ферросилиция в суспензии на 8-е сутки испытаний (рис. 3, область C) отчетливо коррелирует с резким ростом потерь ферросилиция с немагнитной фракцией (хвосты магнитного сепаратора) с 0,5 до 4 кг в сутки, что также наглядно иллюстрируется на вышеприведенной диаграмме (см. рис. 2, область C).

За период испытаний с использованием в процессе азотированного ферросилиция (опыт 2) также были получены аналогичные приведенным выше значения количественных параметров процесса (табл. 2).

В процессе данного этапа испытаний также после 3 дней процесса взаимодействия азотированного ферросилиция с минерализованной водной системой выход немагнитных зерен ферросилиция в пробе хвостов магнитного сепаратора стабилизируется, однако при этом не отмечается их количественный рост, что обусловлено практически отсутствием роста интенсивности процесса окисления ферросилициевых гранул.

Особенности процесса взаимодействия исходного ферросилиция с минерализованной водной системой представлены графически на рис. 4. Приведена диаграмма выхода немагнитной фракции ферросилициевой суспензии, построенная по данным суточного опробования хвостов магнитной сепарации, характер изменения которой соответствует изменениям аналогичного эксперимента с исходным ферросилицием (см. рис. 2).

Изменения графика выхода немагнитной фракции (см. рис. 4) также находятся в соответствии с изменениями графика содержания ферросилиция в суспензии за аналогичные периоды (рис. 5).

Область А, представленная на рис. 4 и 5 отражает период, равный 2 — 3 сут, в течение которого из процесса выводятся окисленные немагнитные примеси, оставшиеся от предыдущих испытаний 1-го этапа и обуславливающие увеличение выхода немагнитной фракции на данном интервале (А) испытаний. Интервал «нормализации» содержания ферросилиция в суспензии на 3-4-е сутки испытаний до исходного значения (500,25 кг) подтверждается резким снижением количества немагнитной фракции, отраженным областью В на рис. 4 и обусловленным практически полным выводом из процесса немагнитных примесей, оставшихся от испытаний предыдущего этапа. Последующие сутки испытаний характеризуются стабильными



Рис. 4. Выход немагнитной фракции при испытаниях азотированного ферросилиция Fig. 4. Yield of the non-magnetic fraction during testing of nitrided ferrosilicon



Рис. 5. Изменение количества ферросилиция (азотированного) в суспензии TCC за период испытаний Fig. 5. Change in the amount of ferrosilicon (nitrided) in the HSS suspension during the test period

и практически постоянными низкими значениями выхода немагнитной фракции, что свидетельствует об отсутствии процесса окисления азотированных зерен ферросилиция за весь период испытаний (см. рис. 5, область С).

Такой характер изменения графиков на рассматриваемых диаграммах, иллюстрирующий практически полное отсутствие потерь азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с минерализованной водной системой, подтверждает отсутствие процессов окисления на поверхности азотированных ферросилициевых гранул.

Сравнительный анализ количественных показателей опытно-промышленных испытаний

Результаты выполненных опытно-промышленных испытаний, приведенные выше, носят достаточно общий характер и включают обработку практически всех количественных показателей, полученных при опробовании технологического процесса длительного взаимодействия исследуемых образцов ферросилиция (исходного и азотированного) с минерализованной оборотной водой. С целью более четкого представления о преимуществах применения азотированного ферросилиция для приготовления ферросилициевой суспензии в схеме TCC алмазосодержащего материала проведена дополнительная обработка полученных данных и выполнен сравнительный анализ результатов отдельных циклов испытаний.

Средние результаты обработки количественных показателей сравнительных испытаний по оценке изменения свойств исходного и азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с оборотной минерализованной водной системой, представленные на рис. 6 и 7, подтверждают преимущества и эффективность использования азотированного ферросилиция для приготовления ферросилициевой суспензии в действующей промышленной схеме процесса TCC алмазосодержащего материала.

Характер сравнительных диаграмм на рис. 6 иллюстрирует преимущество использования азотированного ферросилиция перед исходным за счет большего его сохранения в технологической схеме на протяжении всего периода испытаний, с конечными значениями 489,53 кг (азотированный) и 406,17 кг (исходный)



Рис. 6. Сравнение кинетики изменения количества ферросилиция в ферросилициевых суспензиях TCC с использованием в опытно-промышленных испытаниях исходного (1) и азотированного (2) образцов Fig. 6. Comparison of the kinetics of changes in the content of ferrosilicon in ferrosilicon suspensions of DMS using in pilot tests of the original (1) and nitrided (2) samples

при равнозначной начальной загрузке 500,25 кг. Полученная разница (снижение расхода ферросилиция) в рассматриваемых условиях в конце испытаний (8 сут) составляет 83,26 кг, или 16,7% от исходной загрузки. Приведенные данные подтверждаются аналогичными сравнительными графиками потерь ферросилиция, рассчитанными по количеству суточных проб немагнитной фракции (рис. 7).

Суточные потери немагнитной фракции ферросилиция, замеренные весовым методом, за период испытаний нарастают следующим образом:

• от 0,4 кг на 4-е сутки испытаний до 4 кг на 8-е сутки испытаний с использо-



Рис. 7. Сравнение изменения суточных потерь ферросилиция в схеме испытаний с использованием исходного (1) и азотированного (2) образцов

Fig. 7. Comparison of the kinetics of changes in the daily losses of ferrosilicon in the test scheme using the original (1) and nitrided (2) samples



Рис. 8. Аппроксимация экспериментальных данных по сравнению кинетики изменения содержания ферросилиция в исследуемых суспензиях TCC при испытаниях с использованием исходного (1) и азотированного (2) образцов

Fig. 8. Approximation of experimental data by comparing the kinetics of changes in the content of ferrosilicon in the investigated suspensions of DMS during tests using the original (1) and nitrided (2) samples



Рис. 9. Прогноз времени содержания (срок полезного использования) ферросилиция в исследуемых суспензиях схемы TCC

Fig. 9. Prediction of the content time (useful life) of ferrosilicon in the studied suspensions of the DMS scheme

ванием суспензии на основе исходного ферросилиция (интенсивность процесса окисления ферросилициевых гранул за данный период испытаний растет);

• от 0,2 – 0.25 кг на 4-е сутки испытаний до 2,5 кг на 8-е сутки испытаний с использованием суспензии на основе азотированного ферросилиция (рост интенсивности процесса окисления ферросилициевых гранул за данный период испытаний отсутствует).

Для определения времени полного вывода из процесса ферросилиция экспериментальные данные, представленные на рис. 6, были аппроксимированы с установлением определенных уравнений зависимостей (рис. 8), на основании которых построены графические кривые, прогнозирующие содержание (срок полезного использования) ферросилиция в промышленной схеме TCC алмазосодержащего материала (см. рис. 9).

Результатами математической обработки установлено, что ферросилициевая суспензия на основе исходного (необработанного) ферросилиция теряет свои технологические свойства на 14-е сутки взаимодействия с минерализованной водной системой процесса TCC, а суспензия на основе азотированного ферросилиция — только на 31-е сутки.

Таким образом, азотированный ферросилиций имеет технические параметры, позволяющие увеличить срок его полезного использования не менее чем в 2,2 раза.

Сравнительный анализ качественных показателей опытно-промышленных испытаний

В период сравнительных испытаний согласно утвержденной методике в качестве контролируемых параметров исследованы не только количественные, но и качественные показатели процесса, позволившие выполнить оценку изменения коррозионных свойств исходного и азотированного ферросилиция при длительном взаимодействии с минерализованной водной системой [19, 20].

Получены значения качественных контролируемых параметров процесса (рН водных систем, жидкой фазы фер-



Рис. 10. Сравнение кинетики изменения агрегативной устойчивости ферросилициевой суспензии в схеме испытаний с использованием исходного (1) и азотированного (2) образцов ферросилиция Fig. 10. Comparison of the kinetics of changes in the aggregative stability of the ferrosilicon suspension in the test scheme using the original (1) and nitrided (2) samples of ferrosilicon

росилициевой суспензии, седиментационная устойчивость ферросилициевой суспензии и скорость ее оседания) с использованием исходного и азотированного ферросилиция.

Полученные данные показывают достаточную стабильность физико-химических параметров водных систем и жидкой фазы ферросилициевых суспензий.

Характер представленных сравнительных данных также иллюстрирует преимущество использования азотированного ферросилиция перед исходным за счет в 2 раза большей агрегативной устойчивости приготовленной на его основе ферросилициевой суспензии (рис. 10), что обеспечивает требуемую стабильность и селективность процесса разделения минеральных компонентов в процессе TCC алмазосодержащего материала.

Выводы

Сравнением количественных и качественных показателей процесса опытнопромышленных испытаний по оценке изменения свойств исходного и азотированного ферросилиция в условиях длительного контакта с оборотной минерализованной водной системой установлено:

1. результатами сравнения количественных и качественных показателей процесса опытно-промышленных испытаний, подтвержденными соответствующим актом, установлен факт нарастания суточных потерь немагнитной фракции за период испытаний в количестве 4 кг и 2,5 кг с использованием ферросилициевой суспензии на основе исходного и азотированного ферросилиция соответственно;

2. агрегативная устойчивость ферросилициевой суспензии, приготовленной на основе азотированного ферросилиция, в 2 раза выше аналогичной суспензии исходного ферросилиция, что обеспечивает повышение стабильности и селективности процесса разделения минеральных компонентов в процессе TCC алмазосодержащего материала;

3. результатами математической обработки установлено, что ферросилициевая суспензия на основе исходного (необработанного) ферросилиция теряет свои технологические свойства на 14-е сутки взаимодействия с минерализованной водной системой процесса TCC, а суспензия на основе азотированного ферросилиция — только на 31-е сутки.

Таким образом, азотированный ферросилиций обладает большей коррозионной устойчивостью и имеет технические параметры, позволяющие увеличить срок его полезного использования не менее чем в 2,2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Бондарь С. С., Годун К. В., Горячев Б. Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира (Ч. 2) // Горный журнал. — 2015. — № 2. — С. 67 – 75. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.11.

2. Богданович А. В., Васильев А. М., Урнышева С. А. Влияние рудоподготовки алмазосодержащих руд на технологию их обогащения // Обогащение руд. — 2017. — № 2. — С. 10—15. DOI: 10.17580/or.2017.02.02.

3. Napier-Munn T. The dense medium cyclone – past, present and future // Minerals Engineering. 2018, vol. 116, pp. 107 – 113. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.002.

4. Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 362, no. 1, article 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012130.

5. *Williams R. A., Kelsall G. H.* Degradation of ferrosilicon media in dense medium separation circuits // Minerals Engineering. 1992, vol. 5, no. 1, pp. 57 – 77.

6. Павлов А. В., Островский Д. Я., Аксенова В. В., Бишенов С. А. Текущее состояние производства ферросплавов в России и странах СНГ // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2020. — Т. 63. — № 8. — С. 600—605. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-600-605.

7. Чантурия В. А., Козлов А. П., Шадрунова И. В., Ожогина Е. Г. Приоритетные направления развития поисковых и прикладных научных исследований в области использования в промышленных масштабах отходов добычи и переработки полезных ископаемых // Горная промышленность. — 2014. — № 1. — С. 54.

8. *Махрачев А. Ф., Ларионов Н. П., Савицкий В. Б.* Новые направления в технологии обогащения алмазосодержащего сырья на предприятиях АК «АЛРОСА» // Горный журнал. — 2005. — № 7. — С. 65 — 68.

9. *Авдохин В. М., Чернышева Е. Н.* Сокращение потерь ферросилиция в процессе тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 4. — С. 240—244.

10. *Чернышева Е. Н.* Повышение эффективности тяжелосредного обогащения алмазосодержащих кимберлитов на основе электрохимического кондиционирования ферросилициевой суспензии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 2. — С. 403 — 404.

11. Тимофеев А. С., Ананьев П. П., Двойченкова Г. П. Математическая модель окисления гранул ферросилиция в минерализованных водах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — CB 8. — C. 3—11.

12. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л., Тимофеев А. С. Интенсификация процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 95 — 108. DOI: 10.15372/FTPRPI20220510.

13. *Kryukova O. G., Bolgaru K. A., Avramchik A. N.* Combustion of ferrosilicon-zircon mixtures in nitrogen gas: impact of aluminum additives // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2021, vol. 30, no. 4, pp. 236 – 240. DOI: 10.3103/s10613862210 40051.

14. Manasheva E. M., Manashev I. R., Zathdinov M. Kh., Makarova I. V. Development and application of SHS ferrosilicon nitride to increase the resistance of taphole clays for blast furnaces // Refractories and Industrial Ceramics. 2022, vol. 62, no. 6, pp. 692 – 698. DOI: 10.1007/s11148-022-00664-2.

15. *Runci A., Provis J. L., Serdar M.* Revealing corrosion parameters of steel in alkali-activated materials // Corrosion Science. 2023, vol. 210, part 2, article 110849, DOI: 10.1016/j. corsci.2022.110849.

16. *Михайленко А. А., Гогоци Ю. Г., Руденко О. К.* Патент SU 1654258 A1 Россия. C01B 21/072. Способ получения ультрадисперного порошка AlN. 1991.

17. Bolgaru K. A., Akulinkin A. A., Kryukova O. G. Effect of mechanical pre-activation on the nitriding of aluminum ferrosilicon in the combustion mode // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1459, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1459/1/012009.

18. *Fengnian Shi.* Determination of ferrosilicon medium rheology and stability // Minerals Engineering. 2016, vol. 98, pp. 60 – 70. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.07.016.

19. Vavrenyuk S. V., Vavrenyuk V. G., Farafonov A. E. Increasing sedimentation stability of cement-mineral suspensions by adding the hydroxyl-containing water-soluble polymers // Materials Science Forum. 2023, vol. 1082, pp. 259 – 264. DOI: 10.4028/p-t2k71x.

20. *Heebo Ha, Russ Thompson, Byungil Hwang* Iron oxide layer effects on the sedimentation behavior of carbonyl iron powder suspension // Colloid and Interface Science Communications. 2022, vol. 50, article 100670. DOI: 10.1016/j.colcom.2022.100670.

REFERENCES

1. Chanturia V. A., Bondar S. S., Godun K. V., Goryachev B. E. The current state of the diamond mining industry in Russia and the main diamond-mining countries of the world (Part 2). *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 2, pp. 67–75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.03.11.

2. Bogdanovich A. V., Vasiliev A. M., Urnysheva S. A. Influence of ore preparation of diamond-bearing ores on the technology of their enrichment. *Obogashchenie Rud.* 2017, no. 2, pp. 10–15. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2017.02.02.

3. Napier-Munn T. The dense medium cyclone – past, present and future. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 116, pp. 107–113. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.10.002.

4. Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., Tyulyaeva Y. The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012130. DOI: 10.1088/1755-1315/362/ 1/012130.

5. Williams R. A., Kelsall G. H. Degradation of ferrosilicon media in dense medium separation circuits. *Minerals Engineering*. 1992, vol. 5, no. 1, pp. 57 – 77.

6. Pavlov A. V., Ostrovsky D. Ya., Aksenova V. V., Bishenov S. A. The current state of the production of ferroalloys in Russia and the CIS countries. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 8, pp. 600–605. [In Russ]. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-8-600-605.

7. Chanturiya V. A., Kozlov A. P., Shadrunova I. V., Ozhogina E. G. Priority directions for the development of search and applied scientific research in the field of industrial use of mining and processing waste. *Russian Mining Industry Journal*. 2014, no. 1, pp. 54. [In Russ].

8. Makhrachev A. F., Larionov N. P., Savitsky V. B. New directions in the technology of beneficiation of diamond-containing raw materials at the enterprises of JSC «ALROSA». *Gornyi Zhurnal*. 2005, no. 7, pp. 65–68. [In Russ].

9. Avdokhin V. M., Chernysheva E. N. Reduction of ferrosilicon losses in the process of heavy-medium separation of diamond-containing raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2002, no. 4, pp. 240 – 244. [In Russ].

10. Chernysheva E. N. Increasing the efficiency of heavy-medium enrichment of diamondbearing kimberlites based on electrochemical conditioning of ferrosilicon suspension. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 2, pp. 403 – 404. [In Russ].

11. Timofeev A. S., Ananiev P. P., Dvoychenkova G. P. Mathematical model of oxidation of ferrosilicon granules in mineralized waters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, special edition 8, pp. 3–11. [In Russ].

12. Chanturiya V. A., Dvoychenkova G. P., Chanturiya E. L., Timofeev A. S. Intensification of separation processes of refractory diamond-bearing raw materials of primary, placer and technogenic deposits. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 5, pp. 95–108. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220510.

13. Kryukova O. G., Bolgaru K. A., Avramchik A. N. Combustion of ferrosilicon-zircon mixtures in nitrogen gas: impact of aluminum additives. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2021, vol. 30, no. 4, pp. 236–240. DOI: 10.3103/s1061386221040051.

14. Manasheva E. M., Manashev I. R., Zathdinov M. Kh., Makarova I. V. Development and application of SHS ferrosilicon nitride to increase the resistance of taphole clays for blast furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022, vol. 62, no. 6, pp. 692–698. DOI: 10.1007/s11148-022-00664-2.

15. Runci A., Provis J. L., Serdar M. Revealing corrosion parameters of steel in alkaliactivated materials. *Corrosion Science*. 2023, vol. 210, part 2, article 110849, DOI: 10.1016/j. corsci.2022.110849.

16. Mikhaylenko A. A., Gogotsi Yu. G., Rudenko O. K. *Patent SU 1654258 A1. C01B 21/072*. 1991. [In Russ].

17. Bolgaru K. A., Akulinkin A. A., Kryukova O. G. Effect of mechanical pre-activation on the nitriding of aluminum ferrosilicon in the combustion mode. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020, vol. 1459, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1459/1/012009.

18. Fengnian Shi. Determination of ferrosilicon medium rheology and stability. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 98, pp. 60 – 70. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.07.016.

19. Vavrenyuk S. V., Vavrenyuk V. G., Farafonov A. E. Increasing sedimentation stability of cement-mineral suspensions by adding the hydroxyl-containing water-soluble polymers. *Materials Science Forum*. 2023, vol. 1082, pp. 259–264. DOI: 10.4028/p-t2k71x.

20. Heebo Ha, Russ Thompson, Byungil Hwang Iron oxide layer effects on the sedimentation behavior of carbonyl iron powder suspension. *Colloid and Interface Science Communications*. 2022, vol. 50, article 100670. DOI: 10.1016/j.colcom.2022.100670.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Двойченкова Галина Петровна^{1,2} — д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник; профессор, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-3880. Тимофеев Александр Сергеевич¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: Timofeev ac@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3382-6007. Подкаменный Юрий Александрович^{1,2} — канд. техн. наук, научный сотрудник; преподаватель. e-mail: mirniv.vuriv@mail.ru. ORCID ID: 0000-0002-4104-9113. ¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, ² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Для контактов: Двойченкова Г.П., e-mail: dvoigp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.P. Dvoichenkova^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Chief Researcher: Professor, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-3880, A.S. Timofeev¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3382-6007. Yu.A. Podkamenny^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), Researcher; Lecturer, e-mail: mirniy.yuriy@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4104-9113, ¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia, ² Polytechnic Institute (branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 678170, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia. **Corresponding author:** G.P. Dvoichenkova, e-mail: dvoigp@mail.ru.

Получена редакцией 08.05.2023; получена после рецензии 13.06.2023; принята к печати 10.08.2023. Received by the editors 08.05.2023; received after the review 13.06.2023; accepted for printing 10.08.2023.