

*На правах рукописи*



**ТИМОФЕЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯЖЕЛОСРЕДНОЙ СЕПАРАЦИИ  
АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ОКИСЛЕНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Москва – 2017

Работа выполнена в ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им.  
академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН)

**Научный руководитель:**

**Двойченкова Галина Петровна**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теории разделения минеральных компонентов» отдела «Проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья» Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (ИПКОН РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Горячев Борис Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Обогащение и переработка полезных ископаемых и техногенного сырья» Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ «МИСиС»).

**Козлов Вадим Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, главный технолог ООО «Коралайна Инжиниринг».

**Ведущая организация** – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ЦНИГРИ).

Защита диссертации состоится «21» ноября 2017 г. в 14 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте [www.ипконран.рф](http://www.ипконран.рф).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Матвеева Т.Н.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы:** В последние годы одним из основных методов обогащения алмазосодержащего сырья является процесс тяжелосредной сепарации (ТСС), эффективность которого зависит от стабильности реологических свойств суспензии, физико-химических свойств утяжелителя суспензии и используемых технических водных систем.

Однако вовлечение в промышленную переработку россыпных и техногенных месторождений, а также месторождений, кимберлиты которых подверглись активному вторичному изменению, приводит к модификации ионного состава и окислительно-восстановительных параметров оборотной воды, что обуславливает ускорение процессов окисления ферросилиция, снижение его магнитных свойств и увеличение потерь в цикле регенерации на магнитных сепараторах. Кроме того, увеличение количества поставщиков не обеспечивает стабильной характеристики исходных свойств ферросилиция, что также приводит к увеличению его потерь в технологическом процессе.

Учитывая высокую цену ферросилиция при возрастающих объемах обогащения кимберлитовых руд методом тяжелосредной сепарации сокращение его потерь в технологическом процессе является актуальной задачей.

Проведенными ранее с участием автора исследованиями было установлено, что изменение рН и окислительно-восстановительного потенциала технической водной среды в сторону значений, при которых происходит окисление и разрушение ферросилиция, приводит к нарушению реологических свойств суспензии, потерям ферросилиция в процессе регенерации на магнитных сепараторах и, соответственно, снижению в целом эффективности процесса ТСС.

В соответствии с изложенным перспективным путем решения поставленной задачи является снижение интенсивности воздействия окислителей на ферросилициевые суспензии, обеспечивающие замедление процессов окисления и уменьшение потерь ферросилиция в последующем технологическом процессе.

Кроме того, в настоящее время в связи с расширением объема внедрений процесса ТСС на алмазоизвлекающих фабриках возникает необходимость решения задачи по выбору экспрессного метода оценки качества используемых гранул ферросилиция, актуальность которой обусловлена нестабильностью состава используемых водных систем и технологических свойств ферросилиция, поставляемого различными производителями. Решение поставленной задачи возможно на основе теоретического рассмотрения и построения математической модели процесса окисления ферросилиция в условиях контакта с водными системами, применение которой позволяет, используя экспериментально определенные магнитную восприимчивость и гранулометрическую характеристику ферросилиция,

оценить скорость его окисления в исследуемой водной среде и, соответственно, оценить потери и уровень снижения технологических свойств.

Большой вклад в развитие данного научного направления, ставящего задачей решение проблемы стабилизации технологических свойств ферросилиция в процессе тяжелосредной сепарации, внесли коллективы ученых под руководством И.Н. Плаксина, В.И. Классена и В.А. Чантурия. Наиболее значимыми работами в последние годы являются исследования З.П. Белых, В.М. Авдохина и Е.Н. Чернышевой.

Работа выполнена в рамках проекта «Создание комплексной инновационной экологически безопасной технологии добычи и переработки алмазоносных руд в условиях Крайнего Севера».

**Цель работы:** Разработка способа снижения интенсивности окисления ферросилиция в цикле приготовления и хранения ферросилициевой суспензии для снижения его потерь в процессе тяжелосредной сепарации.

**Задачи исследований:**

- провести анализ современного состояния тяжелосредной сепарации алмазосодержащих кимберлитов и методов повышения ее эффективности;
- разработать математическую модель процесса окисления ферросилиция, позволяющую определить скорость окисления в зависимости от характеристик утяжелителя и водной среды;
- провести анализ основных точек и причин потерь ферросилиция в процессе тяжелосредной сепарации на ОФ №3 МГОКа;
- изучить изменения физических и физико-химических характеристик ферросилициевой суспензии при перемешивании воздухом;
- разработать и апробировать в условиях ОФ №3 Мирнинского ГОКа способ повышения сохранности технологических свойств ферросилиция;
- выполнить оценку экономической эффективности разработанного способа повышения сохранности технологических свойств ферросилиция в операциях приготовления и хранения ферросилициевой суспензии.

**Идея работы:** Применение электрохимически инертного газа (азота) вместо воздуха в операции перемешивания ферросилициевой суспензии для снижения интенсивности ее окисления.

**Научная новизна:**

1. Разработанная математическая модель окисления частиц ферросилиция в водной среде, включающая системы уравнений, отображающих зависимости потери магнитных свойств утяжелителя от времени окисления в водных средах, учитывает характеристики распределения частиц по размерам в исходном ферросилиции.

2. Установлены зависимости снижения магнитных свойств ферросилиция различного дисперсного и химического состава в условиях варьирования ионно-молекулярного состава водной среды, позволяющие произвести выбор марок ферросилиция, наиболее устойчивых к окислению в технологических операциях при использовании агрессивных хлоридных оборотных вод.

3. Установлены зависимости снижения магнитных свойств зерен ферросилиция при окислении в водных средах, насыщенных различными типами газовой среды, позволяющие обосновать применение электрохимически инертного газа – азота в качестве барботажного агента в операциях хранения и перемешивания суспензии в технологических схемах тяжелосредной сепарации алмазосодержащих кимберлитов.

**Практическое значение работы:** Разработан способ повышения эффективности тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья за счет снижения интенсивности окисления ферросилиция, предполагающий применение азота в качестве барботажного агента в операциях приготовления и хранения суспензии, обеспечивающий сокращение потерь ферросилиция на 5%. Разработан алгоритм количественной экспрессной оценки интенсивности процессов окисления различных марок ферросилиция в водной среде.

**Методы исследований:**

Для решения поставленных задач использовались следующие современные физико-химические и технологические методы:

- рентгеноспектральный микроанализ ферросилиция для определения химического состава образцов;
- метод капельного электрофореза для определения содержания катионов и анионов в оборотных водах;
- метод потенциометрии и амперометрии для определения концентрации растворенного кислорода в исследуемых водных системах, величины значений их рН и Eh;
- метод седиментации для определения содержания шламовых частиц (крупность менее 10 - 12 мкм) в суспензиях;
- метод вибрационной магнитометрии для определения магнитных свойств ферросилиция;
- метод лазерной дифракции для определения распределения частиц ферросилиция по размерам;
- технологические исследования процессов приготовления и хранения ферросилициевых суспензий в цикле ТСС проведены на стендовых аппаратах и промышленных установках в условиях ОФ №3 Мирнинского ГОКа.

### **Основные защищаемые положения:**

1. Вероятностно-статистическая математическая модель процесса окисления ферросилиция, разработанная для различных форм дифференциальной кривой распределения частиц по размерам, позволяющая описать кинетику формирования окисленного слоя на поверхности ферросилициевых зерен в водной среде.

2. Снижение технологических свойств суспензии ферросилиция и его повышенные потери обусловлены уменьшением величины намагниченности насыщения ферросилициевых зерен и образованием шламовых частиц крупностью меньше 10-12 мкм вследствие процессов окисления зерен ферросилиция, существенно интенсифицирующихся при повышенных концентрациях в жидкой фазе хлоридных ионов и растворенного кислорода, поступающего в водную среду с воздухом, используемым для перемешивания суспензии.

3. Эффективный способ повышения сохранности технологических свойств ферросилиция в условиях применения агрессивных водных сред, включающий использование электрохимически инертного газообразного азота в качестве барботажного агента для перемешивания ферросилициевой суспензии в цикле ее приготовления и хранения.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов** обеспечивается представительностью исходных данных, использованием современных средств проведения исследований, использованием достоверных и аттестованных методик выполнения измерений. Подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора** состоит в:

- проведении анализа современных методов интенсификации процесса тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья;
- постановке цели и задач исследований, выборе методик;
- разработке математической модели и проведении экспериментальных исследований по изучению процессов окисления ферросилиция;
- участии в опытно-промышленных испытаниях, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, обосновании научных положений и выводов.

**Реализация результатов работы:** Разработанный способ повышения эффективности тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья испытан и внедрен на обогатительной фабрике №3 Мирнинского ГОКа, где обеспечил снижение потерь ферросилиция с ожидаемым экономическим эффектом 2,9 млн. рублей в год.

**Апробация работы:** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПКОН РАН, международных совещаниях «Плаксинские чтения» (2015-2016 гг.); научном симпозиуме «Неделя

горняка» (2016 г.); Международной научной школе молодых ученых и специалистов (2015-2016 гг.).

**Публикации:** По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка использованных источников из 105 наименований, 3 приложений, содержит 121 страницу машинописного текста, 48 рисунков и 16 таблиц.

### Основное содержание работы

Для решения поставленных задач выполнены соответствующие исследования и создана модель процессов окисления поверхности ферросилиция в условиях контакта с рассматриваемыми водными системами.

#### 1. Разработка модели процесса окисления частиц ферросилиция

Пусть в исходном (не окисленном) состоянии шарообразная магнитная частица ферросилиция имеет произвольный диаметр  $D$  и удельную намагниченность насыщения  $J_s^0$  (Рисунок 1а). Тогда эта частица в окисленном состоянии в момент времени  $t$  имеет диаметр равный  $D - 2\Delta$  и удельную намагниченность насыщения  $J_s$  (Рисунок 1б). Данный факт обуславливается переходом в раствор железа ферросилиция в виде трехвалентного железа.



Рисунок 1 – Общий вид шарообразной частицы ферросилиция в исходном (а) и окисленном (б) состоянии

Необходимо отметить, что удельная намагниченность насыщения гетерогенных сплавов, состоящих из ферромагнитной и парамагнитной фаз, определяется составом и количеством ферромагнитной фазы. Она не зависит от дисперсности фаз, уровня микро- и макронапряжений, изменения плотности дислокаций. Таким образом, удельная намагниченность насыщения не является структурно чувствительным свойством ферросилиция.

Согласно выбранному подходу изменение магнитных свойств ферросилиция определяется как отношение объемов магнитной фазы в ферросилиции в текущий

( $V_{\text{магн}}$ ) и в начальный ( $V_{\text{магн}}^0$ ) момент времени. Экспериментально этот параметр определяется как отношение удельных намагниченностей насыщения в текущий и исходный момент времени (в окисленном и исходном состоянии):

$$\frac{V_{\text{магн}}}{V_{\text{магн}}^0} = \frac{J_s}{J_s^0} = \frac{\frac{\pi(D-2\Delta)^3}{6}}{\frac{\pi D^3}{6}} = \frac{(D-2\Delta)^3}{D^3}, \quad (1)$$

где  $J_s^0$  – удельная намагниченность насыщения свежей частицы ферросилиция, Ам<sup>2</sup>/кг;

$J_s$  – удельная намагниченность насыщения окисленной частицы ферросилиция, Ам<sup>2</sup>/кг.

Предположим, что скорость окисления постоянна ( $u = \text{const}$ , мкм/сутки), тогда окисленная часть  $2\Delta$  определяется как:

$$2\Delta = \int_0^t u dt = ut, \quad (2)$$

где  $u$  – интенсивность окисления, мкм/сутки;

$t$  – время окисления, сутки.

а отношение (1):

$$\frac{J_s}{J_s^0} = \frac{(D-ut)^3}{D^3} = \left(1 - \frac{ut}{D}\right)^3 = 1 - 3\frac{ut}{D} + 3\frac{(ut)^2}{D^2} - \frac{(ut)^3}{D^3};$$

или в общем виде:

$$\frac{J_s}{J_s^0} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} W(D) \left(1 - \frac{3ut}{D} + \frac{3(ut)^2}{D^2} - \frac{(ut)^3}{D^3}\right) dD; \quad (3)$$

где  $D_{\max}$  – максимальный диаметр частицы ферросилиция;

$D_{\min}$  – минимальный диаметр частицы ферросилиция;

$W(D)$  – плотность вероятности для случайной величины диаметра частиц ферросилиция.

Так как интеграл от плотности вероятности по всей области задания случайной величины равен единице, выражение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{J_s}{J_s^0} = & 1 - 3ut \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{W(D)}{D} dD + \\ & + 3(ut)^2 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{W(D)}{D^2} dD - (ut)^3 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{W(D)}{D^3} dD. \end{aligned} \quad (4)$$

Проинтегрировав математическую модель с функцией Гаусса ( $\mu = 40$ ;  $\sigma^2 = 170$ ) по  $D_{\max} = 300$  мкм и  $D_{\min} = 0,1$  мкм получаем зависимость скорости окисления от



изменения магнитных свойств частиц ферросилиция при равномерном распределении по крупности:

$$\frac{J_s}{J_s^0} = 1 - 0.09031ut + 0.01212(ut)^2 - 0.01455(ut)^3. \quad (5)$$

## 2. Зависимость скорости окисления ферросилиция от его гранулометрического состава

Из разработанной модели окисления частиц ферросилиция можно выявить зависимость скорости окисления ферросилиция от формы кривой распределения частиц.

В результате математических вычислений определены значения времени  $t$ , за которое намагниченность ферросилиция сократится в 2 раза ( $\frac{J_s}{J_s^0} = 0,5$ ), при различных математических ожиданиях ( $\mu$ ) и дисперсиях ( $\sigma^2$ ) кривой распределения частиц ферросилиция по крупности (Рисунок 2).

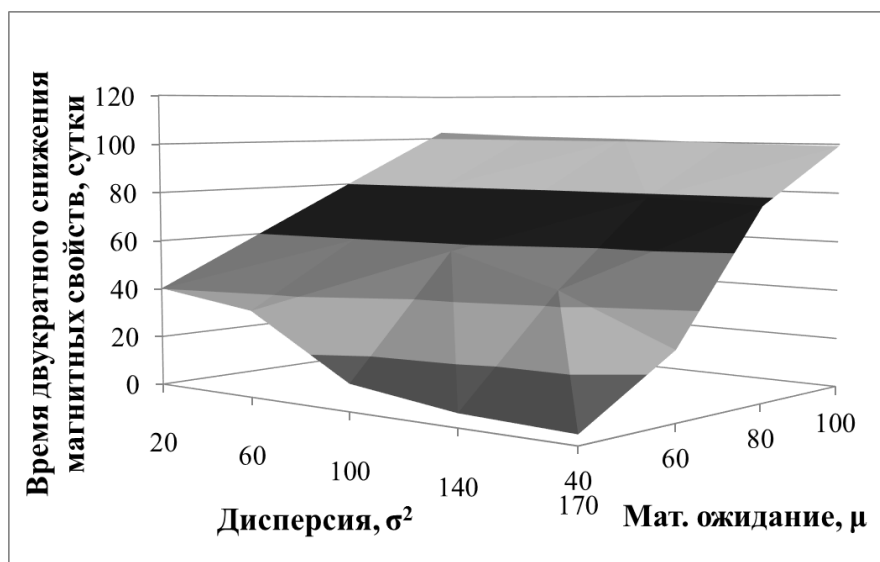


Рисунок 2 – Зависимость времени для потери половины магнитных свойств ферросилиция от формы кривой распределения частиц

Из графического изображения зависимости, представленной на рисунке 2, можно сделать следующие выводы:

- с увеличением математического ожидания (среднего диаметра частиц ферросилиция), время окисления ферросилиция увеличивается, следовательно, ферросилиций становится более устойчив к окислению;
- с увеличением дисперсии кривой распределения диаметра частиц, время окисления ферросилиция уменьшается, следовательно, ферросилиций становится менее устойчив к окислению.

Полученные результаты соответствуют имеющимся данным о параметрах процесса окисления суспензии различного гранулометрического состава, что

достигается детерминированностью выбранного подхода к решению поставленной задачи.

### **3. Алгоритм определения наиболее устойчивого к окислению ферросилиция для исследуемой водной среды**

Для обоснования наиболее устойчивого к окислению ферросилиция для исследуемой водной системы необходимо определить значения величин, входящих в уравнение (4).

1. Определение формы кривой распределения диаметров частиц по размерам  $W(D)$  (гранулометрический состав) исследуемых марок ферросилиция:

- по паспортным данным ферросилиция;
- проведением ситового анализа;
- на анализаторе размера частиц.

2. Определение на вибромагнитометре значений удельной намагниченности насыщения исходных проб исследуемых марок ферросилиция ( $J_s^0$ ).

3. Провести испытания по окислению исследуемых марок ферросилиция в исследуемой водной среде в течение определенного времени  $t$ , суток.

4. Определение на вибромагнитометре значений намагниченности насыщения окисленных проб исследуемых марок ферросилиция ( $J_s$ ).

5. Расчёт по формуле (4) значение скорости окисления ( $u$ , мкм/сутки) исследуемых марок ферросилиция в исследуемой водной среде.

6. Определение наиболее устойчивого к окислению ферросилиция для исследуемой водной среды, по наименьшему значению скорости окисления.

### **4. Апробация алгоритма определения наиболее устойчивого к окислению ферросилиция для условий обогатительных фабрик АК «АЛРОСА»**

В главе 3 диссертации представлены экспериментальные данные по влиянию оборотных вод обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» на магнитные свойства исследуемых марок ферросилиция. Для этого в окисленных в течение 15 суток суспензиях (плотность суспензии 2500 кг/м<sup>3</sup>) определена намагниченность насыщения ферросилиция с использованием вибрационного магнитометра «Lake Shore».

Результаты исследований представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, удельная намагниченность насыщения различных марок ферросилиция варьируется в области от 92,6 и 74,7 Ам<sup>2</sup>/кг, что связано с различием химического состава проб ферросилиция.

Таблица 1 – Сравнительные данные об изменении магнитных свойств суспензий из различных оборотных вод ОФ и образцов ферросилиция

Наименование образцов оборотных вод	Удельная намагниченность насыщения образцов ферросилиция, Ам <sup>2</sup> /кг					
	Imexsar ЮАР		ОФ №3 (DMS Powder)		Washington Mills	
	Исх.	15 сут.	Исх.	15 сут.	Исх.	15 сут.
Оборотная вода ОФ №3	92,2	46,1	75,9	43,4	88,7	50,5
Оборотная вода ОФ №8	92,5	64,2	76,0	62,6	88,5	76,9
Оборотная вода ОФ №12	92,0	45,7	75,8	40,1	88,6	50,1
Сытыканская вода ОФ №12	92,6	70,1	76,3	64,5	88,9	80,1
Оборотная вода ОФ №14	92,4	60,1	76,2	62,3	88,1	74,3
Оборотная вода ОФ №16	91,0	43,8	74,7	39,8	87,0	48,1

В то же время, различная агрессивность образцов оборотных вод приводит к различной интенсивности окисления ферросилиция и, соответственно, неодинаковой потери его магнитных свойств (Рисунок 3).

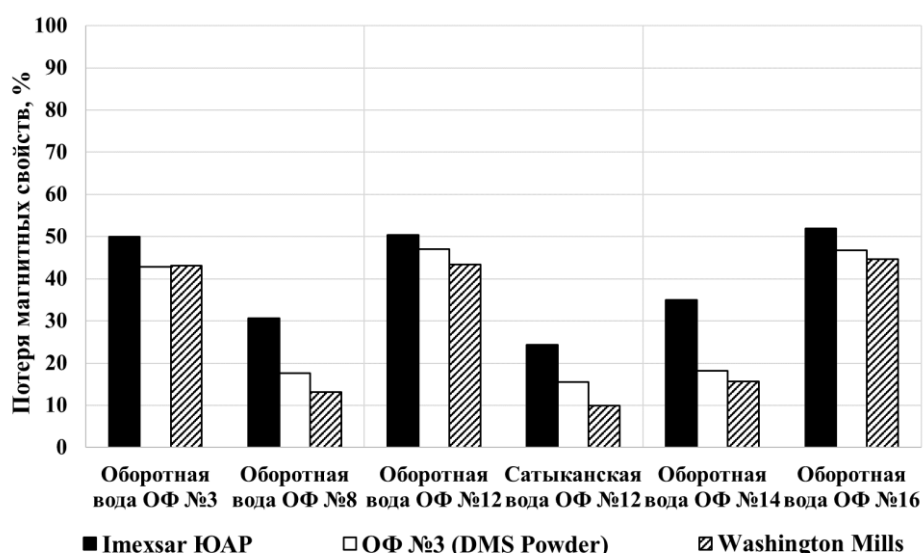


Рисунок 3 – Потеря магнитных свойств различных марок ферросилиция при окислении в исследуемых образцах оборотных вод в течение 15 суток

Как видно из рисунка 3 наибольшая потеря магнитных свойств происходит в оборотных водах ОФ№3, ОФ№12 и ОФ№16, что связано с большей минерализацией этих оборотных вод.

С точки зрения сохранения магнитных свойств суспензий наиболее предпочтительной является наименее минерализованная среда – Сытыканская вода ОФ №12.

Для определения зависимости скорости окисления от гранулометрического состава исследованы три марки ферросилиция. Анализ исходных экспериментальных данных в виде функции распределения частиц трех марок ферросилиция по размерам, полученных с использованием лазерного анализатора размера частиц Fritsch Analysette 22, и последующего дифференцирования функции распределения (Рисунок. 4 - точки),

показал, что уравнение нормального распределения удовлетворительно описывает экспериментальные данные (Рисунок 4).

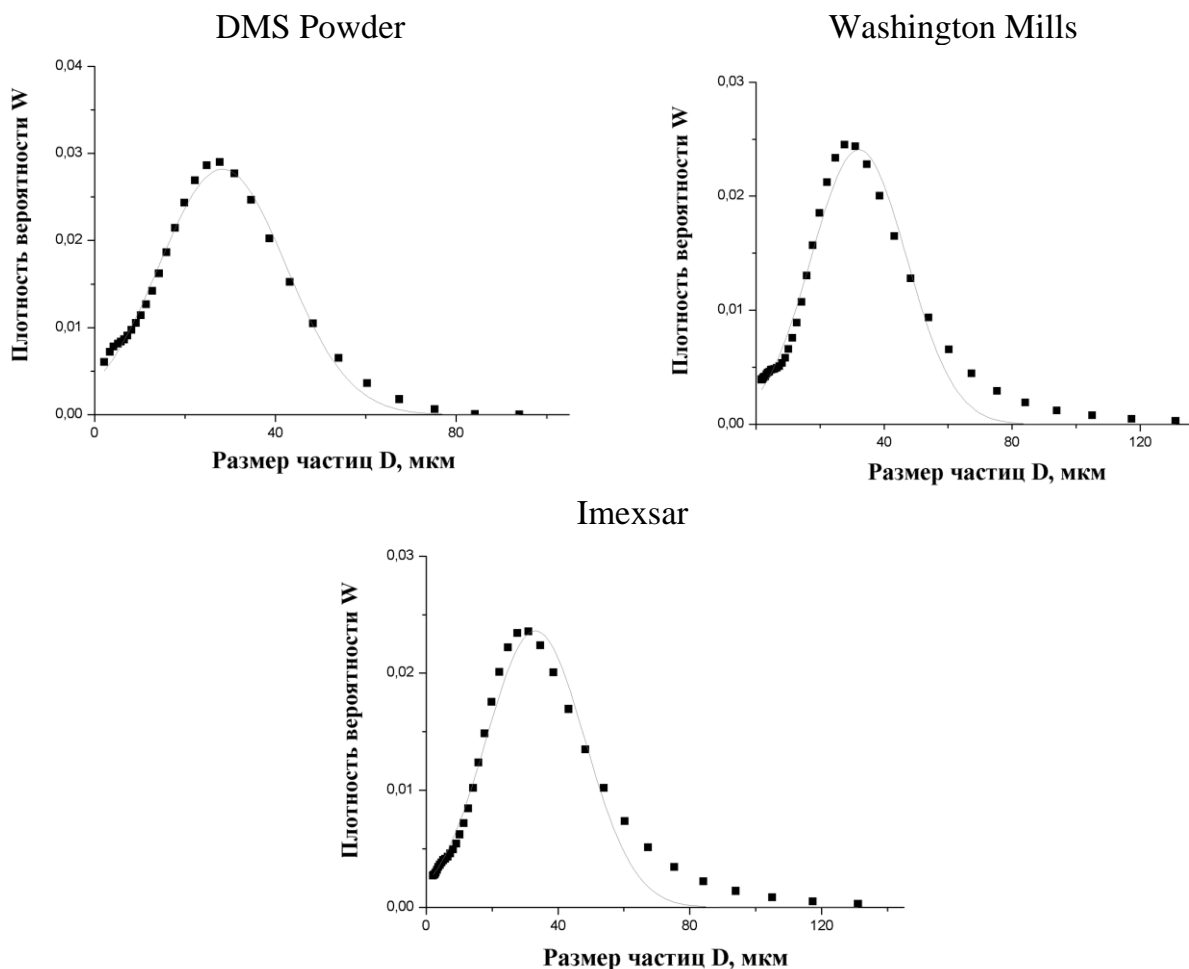


Рисунок 4 – Аппроксимация экспериментальной кривой распределения частиц трех марок ферросилиция по крупности

Уравнение нормального распределения частиц трех марок ферросилиция можно записать в следующем виде:

$$W(D) = \frac{A}{\sqrt{\sigma^2\pi/2}} \exp\left(-2\frac{(D - \mu)^2}{\sigma^2}\right), \quad (6)$$

При подстановке формулы 6 в формулу 4 и последующего вычисления значений интегралов по  $D_{max} = 300$  мкм и  $D_{min} = 0,1$  мкм получены следующие выражения для трех марок ферросилиция:

1. Ферросилиций марки DMS Powder

$$\frac{J_s}{J_s^0} = 1 - 0.17495ut + 0.12393(ut)^2 - 0.19222(ut)^3. \quad (7)$$

2. Ферросилиций марки Washington Mills

$$\frac{J_s}{J_s^0} = 1 - 0.1335ut + 0.07967(ut)^2 - 0.12243(ut)^3. \quad (8)$$

3. Ферросилиций марки Imexsar

$$\frac{J_s}{J_s^0} = 1 - 0.13571ut + 0.07526(ut)^2 - 0.115(ut)^3. \quad (9)$$

По разработанному алгоритму была оценена скорость окисления ферросилиция исследуемых марок в водах различной минерализации (Таблица 3). Для расчета по разработанному алгоритму были использованы полученные зависимости скорости окисления и экспериментальные данные намагниченности насыщения после нахождения ферросилиция в течение 15 суток в минерализованных оборотных водах обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» (Таблица 2).

Таблица 2 – Изменение магнитных свойств образцов ферросилиция в различных оборотных водах обогатительных фабрик АК «АЛРОСА»

Наименование образцов оборотных вод	Удельная намагниченность насыщения образцов ферросилиция, Ам <sup>2</sup> /кг					
	DMS Powder		Washington Mills		Imexsar	
	Исх.	15 сут.	Исх.	15 сут.	Исх.	15 сут.
Оборотная вода ОФ №3	75,9	43,4	88,7	50,5	92,2	46,1
Оборотная вода ОФ №8	76,0	62,6	88,5	76,9	92,5	64,2
Оборотная вода ОФ №12	75,8	40,1	88,6	50,1	92,0	45,7
Сытыканская вода ОФ №12	76,3	64,5	88,9	80,1	92,6	70,1
Оборотная вода ОФ №14	76,2	62,3	88,1	74,3	92,4	60,1
Оборотная вода ОФ №16	74,7	39,8	87,0	48,1	91,0	43,8

Таблица 3 – Скорость окисления ферросилиция (мкм/сутки) в оборотных водах обогатительных фабрик АК «АЛРОСА»

Название проб	DMS Powder	Washington Mills	Imexsar
Оборотная вода ОФ №3	<b>0,086</b>	0,100	0,107
Оборотная вода ОФ №8	<b>0,056</b>	<b>0,057</b>	0,087
Оборотная вода ОФ №12	<b>0,089</b>	0,100	0,107
Сытыканская вода ОФ №12	0,053	<b>0,048</b>	0,078
Оборотная вода ОФ №14	<b>0,057</b>	0,063	0,092
Оборотная вода ОФ №16	<b>0,089</b>	0,101	0,109

Согласно полученным результатам исследований с использованием разработанного алгоритма, с точки зрения сохранения технологических свойств ферросилиция в оборотных водах обогатительных фабрик АК «АЛРОСА», наиболее предпочтительной является марка ферросилиция DMS Powder, за исключением вод малой минерализации (Сытыканская вода ОФ №12 и оборотная вода ОФ №8), в которых предпочтительно использовать ферросилиций марки Washington Mills.

На основе анализа данных о скорости окисления ферросилиция (Таблица 3) и ионном составе оборотных вод фабрик АК «АЛРОСА» были определены типы ионов, концентрация которых в исследуемых водных системах оказывает наиболее существенное влияние на интенсивность процессов окисления ферросилиция. Критерием оценки выбран парный коэффициент корреляции.

Анализом полученных данных установлено, что скорость окисления ферросилиция в наибольшей степени зависит от концентрации хлорид ионов в исследуемых водных системах обогатительных фабрик, что позволяет определить рост

концентрации хлоридных ионов как существенный фактор резкого ухудшения сохранности и технологических свойств ферросилициевой суспензии, а также подтверждает адекватность разработанной модели и используемых в ней алгоритмов решения поставленных задач.

## 5. Определение основных причин потерь ферросилиция в схеме ТСС на ОФ №3 МГОКа

Для определения основных точек процесса и причин потерь ферросилиция было проведено опробование схемы ТСС ОФ №3 МГОКа при участии автора совместно с сотрудниками института «Якутнипроалмаз» и ОТК ОФ№3 МГОКа.

В результате опробования были установлены основные причины и определено количество каждого вида потерь в технологическом процессе ТСС ОФ №3 МГОКа (Таблица 4).

Таблица 4 – Расчет потерь ферросилиция в схеме ТСС ОФ№3МГОКа

Вид потерь ферросилиция в схеме ТСС ОФ№3 МГОКа (В условиях проведенных испытаний и по результатам опробования)	Потери в точках опробования, % от общих потерь
1. С надрешетными продуктами процесса отмывки хвостов и концентрата ТСС от суспензии.	12
2. Вынос с жидкой фазой продуктов ТСС из-за снижения крупности ферросилиция при механическом истирании в водоводах, насосах.	59,6
3. С немагнитной фракцией (хвостами) магнитной сепарации.	8,4
4. Окисление ферросилиция кислородом воздуха и последующее растворения составляющих ферросилиция.	20
Суммарные потери ферросилиция в схеме ТСС (в среднем).	100

В процессе окисления прочностные свойства ферросилиция снижаются, что способствует более интенсивному механическому истиранию ферросилициевых гранул и, как следствие, снижению крупности частиц ферросилиция, образующих группу потерь, обусловленных образованием мелких шламовых классов, характеризующихся пониженными магнитными свойствами.

Таким образом, одной из основных причин потерь ферросилиция в цикле ТСС являются процессы окисления и последующего разрушения ферросилициевых зерен.

Следовательно, для снижения потерь ферросилиция, обусловленных процессами его окисления, необходимо обеспечить в процессе ТСС минимальный контакт ферросилиция с окислителями, в частности с воздухом, используемым в процессе перемешивания и поддержания ферросилиция во взвешенном состоянии в цикле приготовления и хранения ферросилициевой суспензии.

## 6. Изучение влияния операции перемешивания воздухом на физические и физико-химические свойства ферросилициевой суспензии

Изучение влияния воздуха в операции перемешивания ферросилициевой суспензии в цикле ее приготовления и хранения на интенсивность окисления ферросилиция производилось с использованием суспензии, плотностью  $2100 \text{ кг/м}^3$ , круглосуточно барботируемой воздухом с помощью лабораторного компрессора. В исследуемой суспензии в течение 7 суток измерялись значения pH, Eh, содержание растворенного кислорода, содержание шламов и магнитные свойства (Рисунок 5). Для сравнения в условиях проведения экспериментов аналогично исследовались пробы исходной ферросилициевой суспензии без ее перемешивания (фактор окисления хлорид ионами).

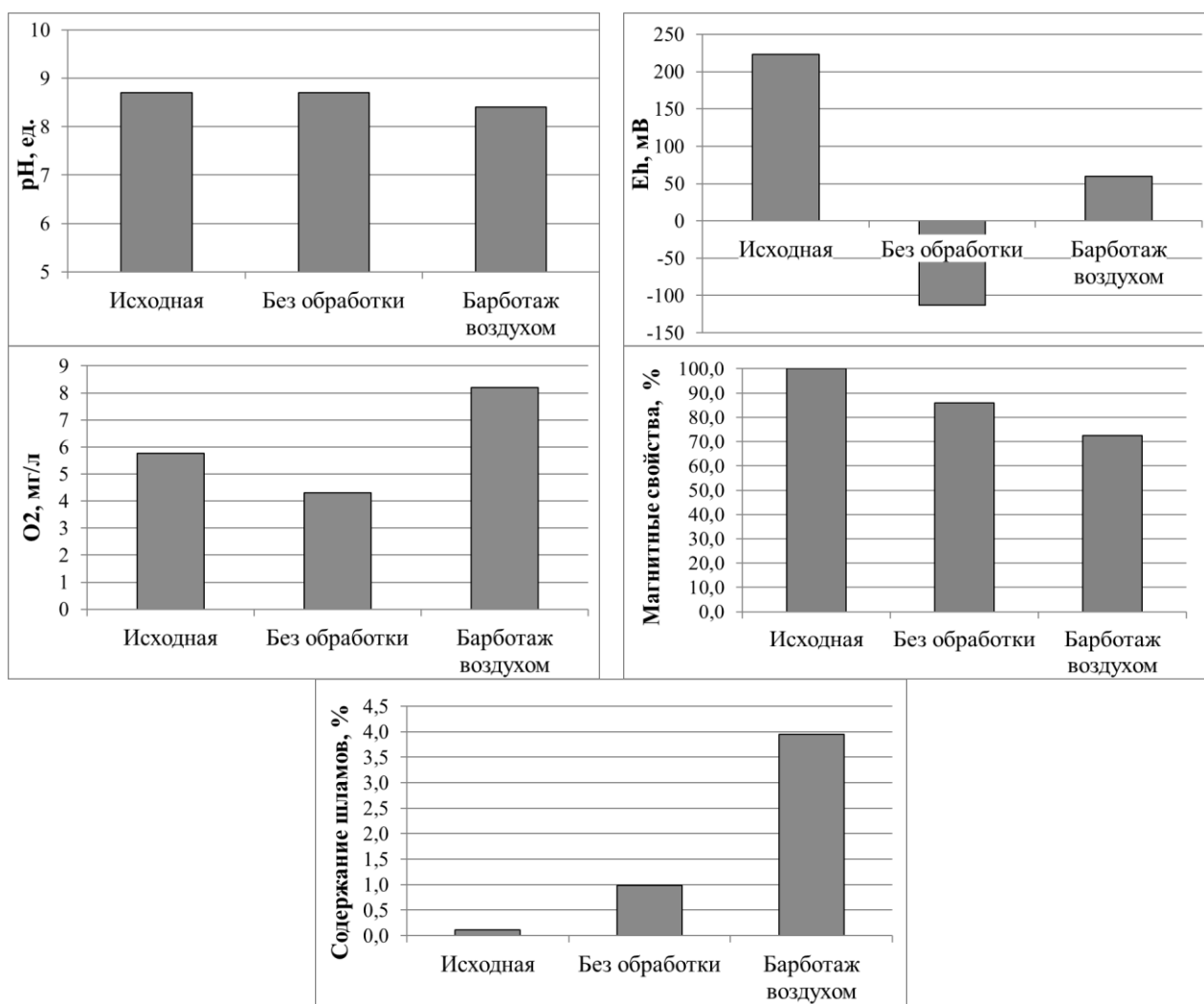


Рисунок 5 – Изменение pH, Eh, концентрации растворенного кислорода, содержания шламов и магнитных свойств частиц ферросилиция в суспензии, барботируемой воздухом в течение 7 суток

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что процессы окисления ферросилиция интенсифицируются при постоянной подаче воздуха, содержащего сильный окислитель – кислород, в объём суспензии в качестве барботажного агента для перемешивания и поддержания ее во взвешенном состоянии в цикле приготовления и хранения. Одним из способов предотвращения окисления ферросилиция в данной операции является замена воздуха, подаваемого в качестве барботажного агента в процесс приготовления и хранения ферросилициевой суспензии, на электрохимически инертный газ – азот, не только не привносящий, но и снижающий концентрацию кислорода в суспензии за счет его вытеснения из суспензионной среды, что предупреждает процесс окисления частиц ферросилиция.

#### **7. Разработка способа повышения сохранности технологических свойств ферросилиция с применением инертного газообразного азота для перемешивания ферросилициевой суспензии в цикле ее приготовления и хранения**

Исследования по возможности применения газообразного азота для предотвращения окисления ферросилиция выполнены в условиях, аналогичных изучению влияния операции перемешивания воздухом на окислительные процессы в объёме ферросилициевой суспензии.

Была приготовлена ферросилициевой суспензия, плотностью 2100 кг/м<sup>3</sup>, круглосуточно барботируемая получаемым с помощью лабораторного генератора азотом, в которой в течение 7 суток измерялись значения pH, Eh, содержание растворенного кислорода, содержание шламов и магнитные свойства ферросилициевых гранул (Рисунок 6).

Полученные результаты характеризуют газообразный азот как эффективную замену воздуха в операции перемешивания ферросилициевой суспензии для повышения сохранности технологических свойств ферросилиция.



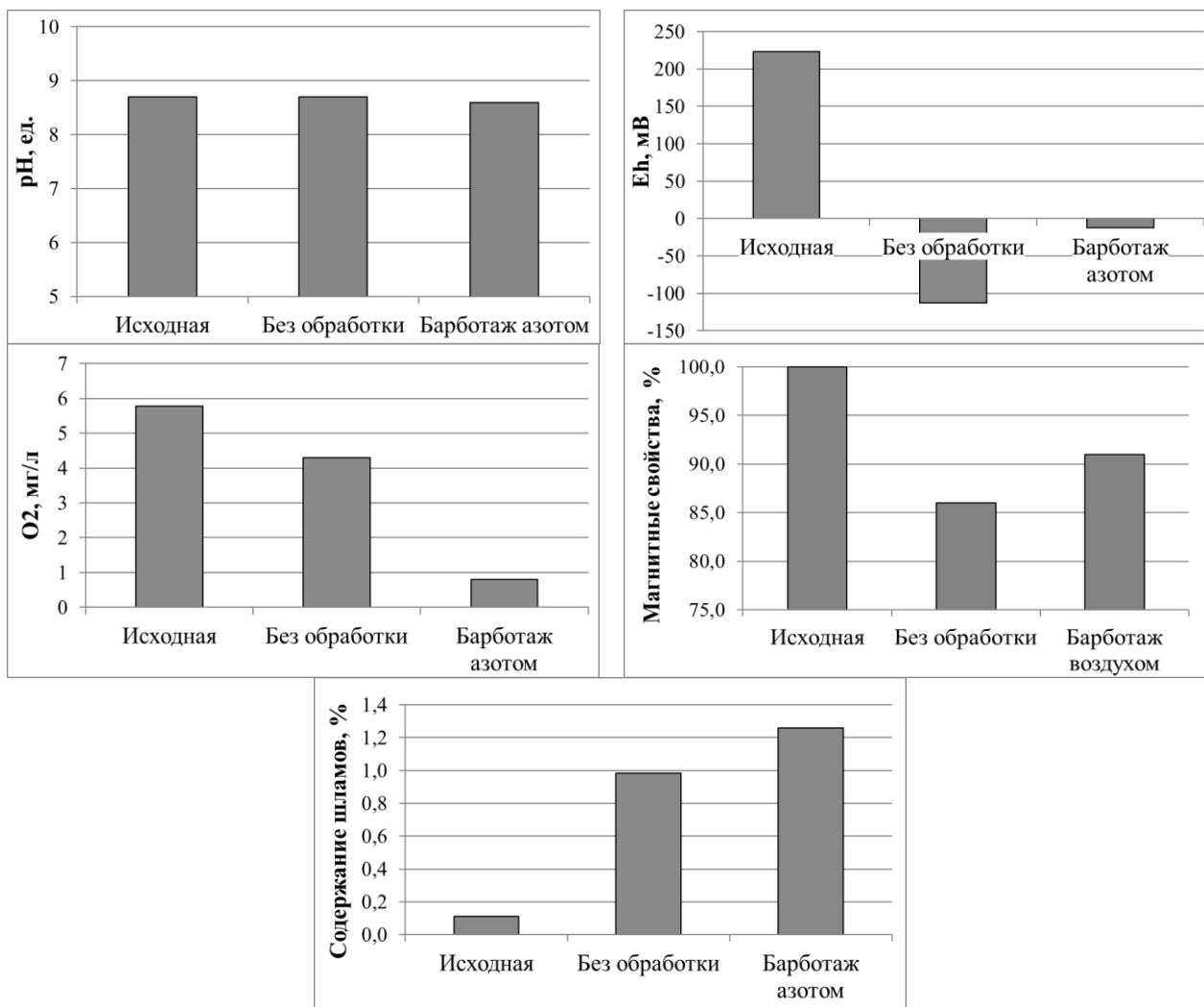


Рисунок 6 – Изменение pH, Eh, концентрации растворенного кислорода, содержания шламов и магнитных свойств частиц ферросилиция в суспензии, барботируемой азотом в течение 7 суток

## 8. Апробация способа повышения сохранности технологических свойств ферросилиция с применением газообразного азота в операции перемешивания ферросилициевой суспензии

На основании анализа результатов, полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях, была разработана методика проведения испытаний в цикле приготовления и хранения ферросилициевой суспензии процесса ТСС ОФ№3 МГОКа с применением азотной станции ОХУМАТ N-800 ЕСО, обеспечивающей выработку электрохимически инертного газа азота для последующего использования в качестве барботажного агента.

Промышленные испытания по применению азотной станции для подачи азота в цикл приготовления ферросилициевой суспензии с целью предотвращения процесса окисления ферросилиция в операции перемешивания суспензии проведены совместно с лабораторией ФМО и СОВ института «Якутнипроалмаз» в условиях ТСС на ОФ№3 МГОКа в два этапа.

Первый этап предполагал испытания с использованием емкости приготовления ферросилициевой суспензии без последующей ее подачи в схему цепи аппаратов ТСС.

Второй этап испытаний выполнен в условиях циркуляции ферросилициевой суспензии в основной промышленной технологической схеме тяжелосредной сепарации, но без подачи в процесс рудного материала (алмазосодержащих кимберлитов).

Схема первого этапа испытаний представлена на рисунке 7. Результаты первого этапа испытаний представлены на рисунке 8.

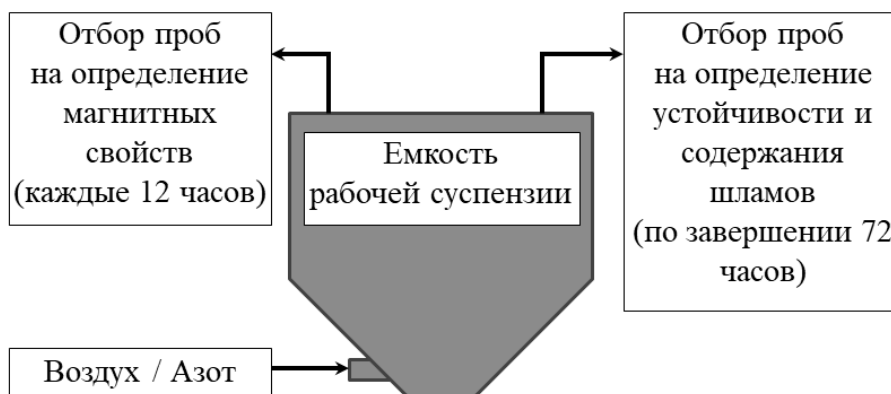


Рисунок 7 – Схема полупромышленных испытаний способа повышения сохранности технологических свойств ферросилиция

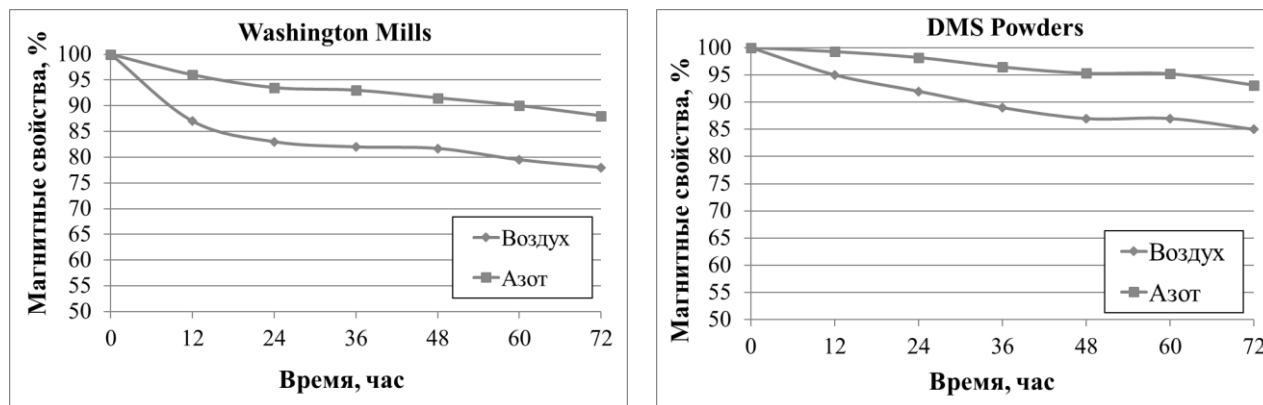


Рисунок 8 – Кинетика изменения магнитных свойств ферросилиция марки «Washington Mills» и «DMS Powders»

Таким образом, в рамках первого этапа установлена эффективность разработанного способа использования газообразного азота в качестве барботажного агента, позволяющего сохранить магнитные свойства ферросилиция за счет исключения его контакта с кислородом воздуха. Дополнительно по результатам испытаний установлено, что в условиях эксперимента ферросилиций марки «DMS Powders» на 68% более устойчив к окислению при перемешивании суспензии воздухом чем ферросилиций марки «Washington Mills», что подтверждается представленной на

рисунке 8 кинетикой изменения магнитных свойств ферросилиция при барботаже воздухом ферросилициевой суспензии, приготовленной на их основе.

Схема второго этапа испытаний представлена на рисунке 9. Результаты второго этапа испытаний представлены на рисунке 10.

Аппроксимация кривых изменения содержания ферросилиция при барботаже суспензии азотом и воздухом позволяет оценить период полного его разрушения. При перемешивании суспензии воздухом полное разрушение суспензии наступит через 15 суток, а при использовании азота - через 22 суток.

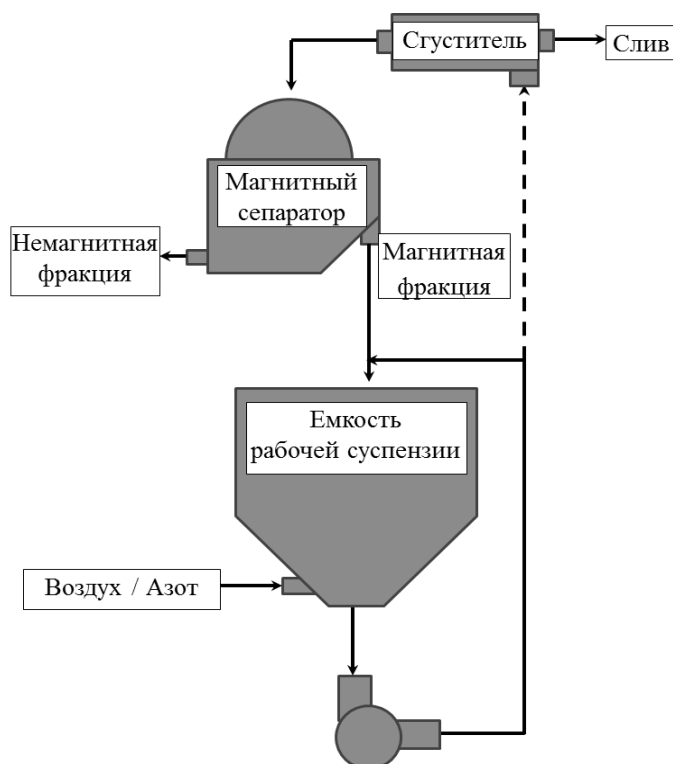


Рисунок 9 – Схема промышленных сравнительных испытаний способа повышения сохранности технологических свойств ферросилиция

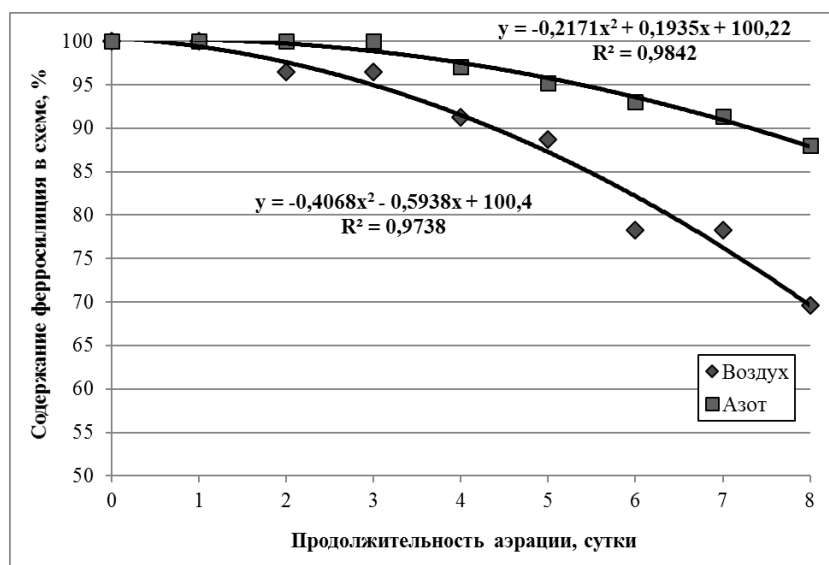


Рисунок 10 – Изменение содержания ферросилиция в схеме при барботировании суспензии азотом и воздухом

Таким образом, применение азота вместо воздуха в качестве барботажного агента при приготовлении и хранении ферросилициевой суспензии позволит снизить потери на 18 % или 2,25% в сутки от его общей загрузки, что подтверждает эффективность использования газообразного азота для предотвращения окисления ферросилиция в переделе ТСС ОФ №3 МГОКа. Результаты исследований подтверждены соответствующими актами испытаний.

Для обоснования экономической эффективности внедрения азотной установки выполнены технико-экономические расчеты по двум вариантам (Таблица 5):

- Вариант 1 – существующая схема ТСС фабрики №3;
- Вариант 2 – схема ТСС фабрики №3 с внедрением азотной установкой (замена атмосферного воздуха на азот).

Таблица 5. Сравнение эксплуатационных затрат внедрения азотной установки

№	Показатели	Ед. изм.	Вариант 1	Вариант 2	Отклонение
Капитальные вложения					
1	Капитальные вложения	тыс. руб.	0	2154,6	2154,6
2	Срок службы установки ОХИМАТ	лет	0	10	
Расчет эксплуатационных затрат					
1	Амортизационные отчисления	тыс. руб.	0	215,46	-215,46
2	Ферросилиций	тыс. руб.	18669	17439	1230
3	Электроэнергия	тыс. руб.	351	569	-217,7
Эффективность		тыс. руб.	19020	13975	797
Срок окупаемости		лет			2,7

Эффективность составит 2,9 млн. руб. Срок окупаемости 9 месяцев.

### Заключение

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи повышения эффективности тяжелосредного обогащения алмазосодержащих кимберлитов за счет снижения потерь ферросилиция.

Основные выводы заключаются в следующем:

1. Разработана вероятностно-статистическая математическая модель процесса окисления ферросилиция для различных форм дифференциальной кривой распределения частиц по размерам, включающая системы уравнений, отображающих зависимости потери магнитных свойств утяжелителя от времени окисления в водных средах и позволяющая определить функциональную зависимость снижения его магнитных свойств от параметров распределения частиц по размерам в исходном ферросилиции.

2. С использованием разработанной модели показано, что при увеличении среднего диаметра частиц ферросилиция время его окисления увеличивается и ферросилиций становится более устойчивым к окислению. При этом с увеличением

дисперсии распределения диаметра частиц время окисления ферросилиция уменьшается и ферросилиций становится менее устойчив к окислению.

3. Показано, что снижение технологических свойств ферросилиция и его повышенные потери обусловлены уменьшением величины удельной намагниченности насыщения ферросилиция и образованием шламовых классов крупностью меньше 10-12 мкм вследствие его окисления, существенно усиливающегося при повышенных концентрациях в жидкой фазе хлоридных ионов и растворенного кислорода, поступающего в водную среду с воздухом, используемым для перемешивания суспензии.

4. Установлены зависимости снижения магнитных свойств ферросилиция различного дисперсного и химического состава в условиях варьирования ионно-молекулярного состава водной среды, определены значения скорости окисления различных марок ферросилиция и выбраны наиболее устойчивые образцы для использования в технологических процессах ТСС в условиях применения насыщенных хлоридами оборотных водных систем обогатительных фабрик АК «АЛРОСА».

5. Установлены зависимости снижения магнитных свойств при окислении ферросилиция растворами, насыщенными различными типами газовой среды, обосновывающие замену воздуха электрохимически инертным газом – азотом в операциях хранения и перемешивания суспензии в технологических схемах тяжелосредной сепарации алмазосодержащих кимберлитов.

6. Разработан эффективный способ повышения сохранности технологических свойств ферросилиция в условиях применения агрессивных водных сред, включающий применение электрохимически инертного газообразного азота в качестве барботажного агента в операции приготовления и хранения ферросилициевой суспензии.

7. Проведенными промышленными испытаниями показано, что разработанный способ повышения сохранности технологических свойств ферросилиция с применением азота в качестве перемешивающего барботажного агента в операциях приготовления и хранения суспензии позволяет снизить потери ферросилиция на 2,25% в сутки и уменьшить на 5% суммарные потери утяжелителя в технологическом процессе ТСС ОФ №3 Мирнинского ГОКа. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанного способа повышения эффективности процесса тяжелосредной сепарации составляет 2,9 млн. рублей в год.

#### **Основные положения диссертационной работы опубликованы в трудах:**

1. Тимофеев А.С. Экспериментальное обоснование электрохимического и физико-химического методов стабилизации параметров ферросилициевой суспензии /

Двойченкова Г.П., Чернышева Е.Н., Ковальчук О.Е. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 9. С. 41-48.

2. Тимофеев А.С. Математическая модель окисления гранул ферросилиция в минерализованных водах / Ананьев П.П., Двойченкова Г.П. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5 (специальный выпуск 8). С. 3-11.

3. Тимофеев А.С. Анализ методов повышения эффективности процесса тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья / Чернышева Е.Н., Двойченкова Г.П., Миненко В.Г., Интогарова Т.И. // «Наука и инновационные разработки – Северу» сборник докладов. 2014 Издательство Сибирского отделения РАН (Новосибирск) Мирный, 10-12 марта 2014 г. С. 326-330.

4. Тимофеев А.С. Экспериментальное обоснование физико-химических параметров стабилизации свойств ферросилиция для условий тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья / Двойченкова Г.П., Миненко В.Г. // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья, Плаксинские чтения – 2015: материалы международной конференции под общей редакцией В.А. Чантурия, Т. В. Чекушиной - Иркутск: ООО «Полиграфический центр «РИЭЛ», 21-25 сентября 2015 г., г. Иркутск С. 251-253.

5. Тимофеев А.С. Стабилизация свойств ферросилиция для условий тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья / Двойченкова Г.П., Миненко В.Г. // Материалы 12 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», 23-27 ноября 2015 г. –М: ИПКОН РАН, 2015, С.243-245.

6. Тимофеев А.С. Экспериментальная оценка эффективности азотирования ферросилициевой суспензии в цикле ее подготовки для процесса ТСС алмазосодержащих руд / Двойченкова Г.П., Миненко В.Г. // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья, Плаксинские чтения – 2016: материалы международной конференции под общей редакцией В.А. Чантурия, Т. В. Чекушиной - М.: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 26-30 сентября 2016 г., г. С.-Петербург. С. 202-203.

7. Тимофеев А.С. Модифицирования свойств ферросилициевой суспензии в цикле тяжелосредной сепарации / Двойченкова Г.П., Миненко В.Г. // Материалы 13 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», 21-25 ноября 2016 г. – М: ИПКОН РАН, 2016, С.314-316.