

УДК 661.832

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ФЛОТАЦИИ ДЛЯ ОБЕСШЛАМЛИВАНИЯ КАЛИЙНОЙ РУДЫ

**Ермолаева Вера Анатольевна,**

кандидат химических наук, доцент, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, (Россия, г.

Муром), ErmolaevaVA2013@mail.ru

### Аннотация

В статье рассмотрен процесс обесшламливания калийной руды с применением флотационной машины. Описаны физико-химические основы флотации, виды флотационных процессов, приведен анализ классификации флотомаши. Выполнен технологический расчёт оборудования: определено число камер для основной, контрольной и перечистной флотации, время флотации, объём контактного чана. Даны рекомендации по эксплуатации флотомашины для обеспечения эффективной работы в производстве хлорида калия.

**Ключевые слова:** флотация, обогащение калийной руды, виды флотационных процессов.

## USING THE FLOTATION METHOD TO REMOVE SLUDGE FROM POTASH ORE

**Vera A. Ermolaeva,**

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,

Murom Institute (branch) Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov,  
(Murom, Russia), ErmolaevaVA2013@mail.ru

### ABSTRACT

The article discusses the process of sludge removal from potash ore using a flotation machine. It describes the physical and chemical principles of flotation, the types of flotation processes, and provides an analysis of the classification of flotation machines. The article also performs a technological calculation of the equipment, determining the number of chambers for primary, control, and re-flotation, the flotation time, and the volume of the contact vat. The article provides recommendations for the operation of the flotation machine to ensure efficient production of potassium chloride.

**Keywords:** flotation, potash ore enrichment, types of flotation processes.

Обесшламливание - удаление наиболее тонкодисперсной части измельченных руд(шламов) из пульпы целью повышения качества концентрата. Обесшламливание основано на разнице в скоростях движения частиц разной крупности под действием силы тяжести или центробежной силы в водной среде [1]. В качестве объекта исследования в данной работе выбран технологический процесс обесшламливания калийной руды для производства хлорида калия. При проектировании технологического процесса выполнено следующее:

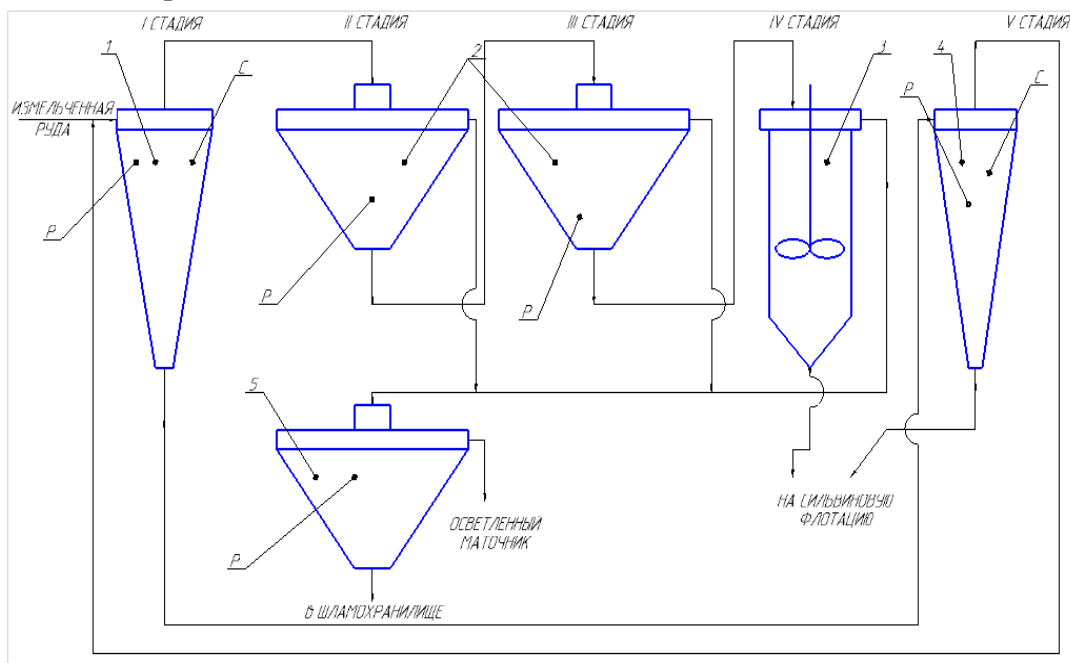
- дана характеристика целевого продукта и описание физико-химических свойств калийной руды;

- представлено подробное описание технологической схемы процесса;
- проанализированы виды оборудования, входящие в технологическую линию;
- изучены физико-химические основы метода флотации, виды флотации;
- проведен сравнительный анализ флотомашин различного типа;
- предоставлены технологические схемы производства и аппаратов;
- произведен технологический расчет флотационной машины;

Хлорид калия - главный вид продукции калийной промышленности. Так как сильвинит представляет механическую смесь кристаллов сильвинита и галита, их разделение с целью получения хлористого калия возможно как физико-химическими методами (растворением и отдельной кристаллизацией), так и механическими (флотацией, гравитационной сепарацией, электросепарацией)[2]. Основными составляющими сильвинитовых руд и флотоконцентратов  $KCl$  являются сильвин, галит и водонерастворимый остаток. Нерастворимая часть руд представлена карбонатами (доломит, магнезит), сульфатами (ангидрит, гипс) и алюмосиликатами (гидрослюда, полевопшпат).

Описание технологического процесса обесшламливания калийной руды

Обесшламливание калийных руд большим содержанием нерастворимого осадка осуществляется по многостадийным схемам. Основное количество шламов выделяется методами в гидроциклонах и гидросепараторах с последующим флотационным доизвлечением оставшегося количества тонкодисперсных глинистых фракций[3]. На производстве процесс обесшламливания измельченной руды осуществляется с применением двух гидроциклонов. Технологическая схема обесшламливания калийной руды представлена на рис.1.



1-гидроциклон; 2- гидросепаратор; 3-флотационная машина; 4- перечисной гидроциклон; 5- шламовый гидросепаратор; 6 -сгуститель.

Рис. 1 Технологическая схема обесшламливания калийной руды [5].

Цель обесшламливания – это уменьшение в суспензии, поступающей на флотацию содержания нерастворимого остатка: мелкодисперсных глинистых частиц, мешающих пенной сепарации [4]. Разберем особенности процесса по стадиям:

1. Первичное обесшламливание в гидроциклоне - грубое разделение пульпы на две фракции по крупности и плотности. Исходная измельченная руда в виде пульпы подается в гидроциклон 1. Под действием центробежных сил более крупные и тяжелые частицы (пески) отбрасываются к стенкам и выходят вниз. Пески содержат основную массу сильвина (ценный компонент) и направляются на сильвинную флотацию. Тонкие легкие частицы (0,15–0,25 мм) уходят в слив через верхний патрубок и поступают на 2 стадию. Пески 1 стадии дополнительно перекачиваются на 5 стадию (в перечисные гидроциклоны 4).

2. Обесшламливание в гидросепараторе - более тонкое выделение частиц нерастворимого остатка в слив за счет восходящего потока воды. В гидросепараторе 2 создается скоростной восходящий поток. Тонкий минеральный нерастворимый остаток с примесью галита и сильвина не оседает, выносится в слив и направляется на операцию сгущения (в гидросепаратор-сгуститель 5). Более крупные и тяжелые пески опускаются вниз и подаются на 3 стадию обесшламливания.

3. Повторное обесшламливание в гидросепараторе - дополнительное извлечение н.о. из песков 2 стадии. Сливы 3 стадии объединяется со сливом 2 стадии и направляется на сгущение. Пески 3 стадии направляются на 4 стадию.

4. Шламная флотация - извлечение оставшихся ценных компонентов (мелких зёрен сильвина, галита) из шламов перед их удалением. Пенный продукт (концентрат шламовой флотации) содержит некоторое количество сильвина и направляется на сгущение вместе со сливами гидросепараторов. Камерный продукт (хвосты шламовой флотации) – это уже обедненный материал, который вместе с песками 5 стадии подается на основную сильвинную флотацию (как дополнительное питание).

5. Перечисное обесшламливание и сгущение - замыкание цикла, возврат ценных фракций и удаление финальных шламов в хвостохранилище. Пески гидроциклонов 1 стадии перекачиваются в перечисные гидроциклоны для доочистки от шламов. Слив гидроциклонов 5 стадии возвращается в питание 1 стадии (замкнутый цикл). Пески гидроциклонов 5 стадии поступают на сильвинную флотацию. В гидросепаратор-сгуститель объединенным потоком поступают сливы гидросепараторов 2 и 3 стадий, пенный продукт шламовой флотации и для ускорения осаждения добавляют коагулянты [3].

#### Виды флотационных процессов

Различают несколько основных видов флотации. Приведено описание их ключевых характеристик: физико-химической сущности, типового оборудования, достоинств и недостатков.

Пленочная флотация является исторически одним из самых простых методов. Её физико-химическая сущность основана на свойстве гидрофобных частиц удерживаться на поверхности раздела фаз «жидкость-газ»: частицы высыпаются на спокойную водную поверхность. Оборудование для этого метода – простейшие установки: лотки, ванны, иногда с движущейся поверхностью воды. Достоинства пленочной флотации – предельная простота, низкие энергозатраты и отсутствие необходимости в реагентах. Однако её недостатки настолько серьезны, что метод не получил широкого распространения: крайне

низкая производительность, высокая чувствительность к любым волнениям и вибрациям [4].

Масляная флотация использует избирательную способность минералов прилипать к каплям масла. Гидрофобные частицы собираются маслом и всплывают на поверхность. В качестве оборудования применяют контактные чаны и сепараторы для отстаивания и разделения масляной эмульсии и хвостов. Метод хорошо подходит для обогащения сульфидных минералов и угля, позволяет получать высококонцентрированные продукты. Но у него есть серьёзные минусы: очень высокий расход масла, недостаточная селективность разделения, пожароопасность и экологические риски. По этим причинам масляная флотация в чистом виде используется редко.

Вакуумная флотация основана на явлении выделения газа из перенасыщенного раствора. Воздух растворяют в жидкости под повышенным давлением, а затем при резком снижении давления из раствора выделяются мельчайшие пузырьки, которые флотируют частицы. Процесс ведётся в герметичных флотационных камерах с вакуум-насосами, системами насыщения и деаэрации жидкости. Достоинства метода: минимальное разрушение флотокомплексов (процесс идёт в спокойной среде), низкие энергозатраты на образование пузырьков, возможность получать очень мелкие пузырьки. Недостатки — сложность конструкции и эксплуатации, низкая степень насыщения воды воздухом (ограниченная концентрация частиц — не более 250–300 мг/л), необходимость в герметичном оборудовании.

Пенная флотация — наиболее распространённый и универсальный промышленный метод. Его сущность: гидрофобные частицы селективно прилипают к пузырькам воздуха, диспергированным в пульпе, и комплексы «частица-пузырёк» всплывают, образуя минерализованную пену. Оборудование разнообразно: механические (импеллерные), пневматические, пневмомеханические и колонные флотомашин. Достоинства пенной флотации — высокая производительность и селективность, универсальность, непрерывность и хорошая управляемость процесса. Недостатки: высокое энергопотребление, необходимость точного дозирования реагентов, а также неэффективность для очень тонких частиц (менее 5 мкм). Тем не менее, пенная флотация остаётся основным методом обогащения руд цветных и редких металлов [4].

Флотация кипячением (или флотация в кипящем слое) является разновидностью пенной флотации. Её особенность — пульпа находится во взвешенном (псевдооживленном) слое за счёт интенсивной подачи воздуха снизу, что улучшает контакт частиц с пузырьками. Оборудование — флотомашин с кипящим слоем, часто колонного типа с перфорированным дном для равномерной аэрации. Достоинства метода: эффективен для крупнозернистых материалов, интенсивное перемешивание пульпы и пузырьков воздуха повышает контакт. Недостатки — более сложная конструкция оборудования по сравнению с обычными пневмомеханическими машинами, необходимость точной настройки аэрации и поддержания стабильного кипящего слоя, меньшая производительность по сравнению с классической пенной флотацией. Тем не менее, флотация кипячением находит применение при переработке труднообогатимых руд с крупным вкраплением полезного компонента.

Таким образом, каждый из описанных методов имеет свою область применения. Выбор конкретного метода определяется свойствами сырья, требуемой селективностью, экономическими и экологическими ограничениями.

Анализ классификации флотомашин

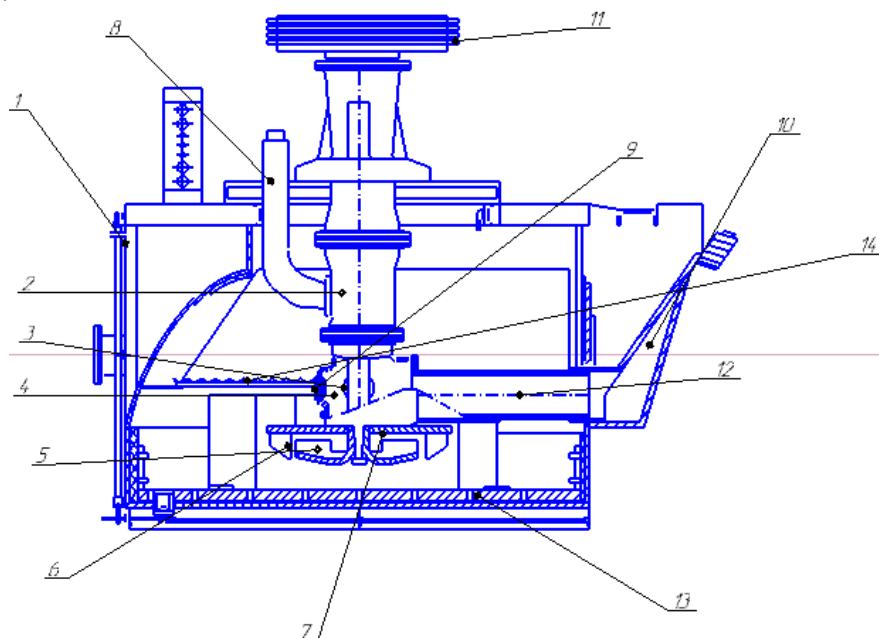
Таблица 1. Особенности устройства и работы различных типов флотомашин.

Тип	Особенности конструкции	Преимущества	Недостатки	Области применения
-----	-------------------------	--------------	------------	--------------------

Механическая	Сдвоенные прямоугольные камеры (всасывающая и прямоточная), Вращающийся импеллер для перемешивания пульпы, засасывания и диспергирования воздуха.	Высокая интенсивность перемешивания Хорошая аэрация пульпы Простота эксплуатации Надежность Возможность регулирования количества засасываемого воздуха	Высокое энергопотребление Чрезмерная турбулентность может разрушать флотоагрегаты	Цветная металлургия (руды меди, цинка, никеля), углеобогащение, флотация калийных солей.
Пневмомеханическая	Комбинация механического перемешивания (импеллер) и принудительной подачи сжатого воздуха (компрессор)	Регулировка воздушного потока Меньший износ подвижных частей Равномерное распределение пузырьков воздуха	Сложность конструкции Необходимость в дополнительном компрессорном оборудовании	Переработка труднофлотирующих руд цветных металлов, золота, угля, калийных солей
Пневматическая, аэролифтная, пагубочная	Высота ванны до 2–3 м Аэрация и перемешивание только сжатым воздухом, подаваемым через аэраторы (пористые перегородки, щелевые затворы) без механических аэраторов.	Простота конструкции Отсутствие быстроизнашивающихся вращающихся деталей Низкое энергопотребление Малая металлоемкость Интенсивное вихревое движение пульпы в зонах дробления воздуха	Необходимость в воздуходувках/компрессорах и насосах Повышенный и неэффективный расход воздуха Ограниченная область применения (простые схемы)	Флотация угля, калийных руд, в простых технологических схемах.
Колонная, пенная сепарация	Высокая вертикальная колонна. Противоток: пульпа движется вниз, а воздух подается снизу. Наличие системы промывки пены.	Высокая степень очистки и эффективность разделения Меньший расход реагентов Эффективность для тонкодисперсных материалов Образование слоя устойчивой пены	Сложность управления гидродинамическими параметрами Необходимость автоматизации Требует стабильного управления и контроля	Тонкая и сверхтонкая флотация руд, доочистка концентратов, переработка тонкоизмельченных минералов

Расчет флотационной машины, применяемой для обесшламливания

Для проведения операций флотации в технологической схеме (Рис.1) предусматриваем применение флотомашин механического типа с «кипящим слоем», которая представляет собой прямоугольную ванну, разделенную перегородками на ряд камер.



1 - корпус; 2- центральная труба импеллера; 3- вал импеллера; 4- надимпеллерный стакан; 5- импеллер; 6- направляющие лопатки; 7- надимпеллерный диск; 8- патрубок для подачи воздуха; 9- пробка; 10- циркуляционный карман; 11- ременный шкив; 12- труба циркуляционная; 13- футеровка; 14 - решетка кипящего слоя

Рис. 2 Флотационная машина ФКМ-6,3 КС (изображение создано в целях иллюстрации устройства флотационной машины)

Флотационная машина состоит из отдельных секций. Каждая камера оснащена блоком аэратора, который включает центральную трубу импеллера (поз. 2) и вращающийся внутри неё вал (поз. 3) с импеллером (поз. 5). Импеллер выполнен в виде слегка вогнутого диска с шестью радиальными лопатками. Для опорожнения камеры от пульпы при профилактике или ремонте предусмотрено отверстие с пробкой (поз. 9).

Основной рабочий орган - импеллер - для подсосывания и диспергирования воздуха, для перемешивания и аэрации пульпы. На передней стенке каждой камеры смонтирован циркуляционный карман (поз. 10). Нижняя часть центральной трубы расширена и образует надимпеллерный стакан (поз. 4), к которому крепятся надимпеллерный диск (поз. 7) с направляющими лопатками (поз. 6). В этом диске имеются отверстия для циркуляции пульпы внутри камеры.

Исходная пульпа поступает в камеру через приёмный карман и засасывается в зону над импеллером. Оттуда с высокой скоростью выбрасывается между лопатками статора внутрь камеры. В зоне импеллера создаётся разрежение, благодаря чему через трубу (поз. 8) из атмосферы засасывается воздух. Импеллер диспергирует его на мелкие пузырьки, которые равномерно распределяются по объёму камеры. При контакте пузырьков с минеральными частицами происходит прилипание, после чего пузырьки поднимаются на поверхность пульпы, образуя минерализованную пену [5]. Пена непрерывно удаляется в желоб.

Рассчитаем число камер, необходимых для проведения основной флотации:

$$n_{\text{кам}} = \frac{V_{\text{мин}} \cdot \tau}{n_{\text{сек}} \cdot k \cdot V_k}$$

где  $V_{\text{мин}}$  - минутный объем пульпы, поступающей на флотацию, м<sup>3</sup>/ч;

$\tau$  - время флотации,  $\tau = 5$  мин;  $V_k$  - объем камеры, м<sup>3</sup> ( $V_k = 6,3$  м<sup>3</sup>);

$k$  - коэффициент заполнения камеры,  $k = 0,8$ ;  $n_{\text{сек}}$  - число секций;

На основную флотацию поступает 2000 м<sup>3</sup>/ч пульпы.

Определим минутный объем пульпы:

$$V_{\text{мин}} = \frac{2000}{60} = 33,3 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$n_{\text{кам}} = \frac{33,3 \cdot 5}{9 \cdot 0,8 \cdot 6,3} = 3,7.$$

Принимаем 4 камеры.

На контрольную флотацию поступает 1800 м<sup>3</sup>/ч пульпы.

$$V_{\text{мин}} = \frac{1800}{60} = 30 \text{ м}^3/\text{мин};$$

$$n_{\text{кам}} = \frac{30 \cdot 3}{9 \cdot 0,8 \cdot 6,3} = 1,9.$$

Принимаем 2 камеры.

Принимаем для проведения основной и контрольной флотации одну флотомашину с 6-ю камерами из расчета 4 камеры на основную флотацию и 2 камеры на контрольную.

Время основной и контрольной флотации составит:

$$\tau = \frac{V_k \cdot n_{\text{кам}} \cdot k \cdot n_{\text{сек}}}{V_{\text{мин}}}, \text{мин}$$

где  $k$  - коэффициент заполнения камеры,  $k = 0,8$ ;  $n_{\text{кам}}$  - число камер;

$$\tau = \frac{6,3 \cdot 4 \cdot 0,8 \cdot 9}{33,3} = 5,4 \text{ мин};$$

$$\tau = \frac{6,3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 9}{30} = 3 \text{ мин}.$$

Рассчитаем число камер флотомашин ФКМ-6,3 КС, необходимых для проведения перемешивающей флотации, на которую поступает 1600 м<sup>3</sup>/ч пульпы.

Определим минутный объем пульпы:

$$V_{\text{мин}} = \frac{1600}{60} = 26,67 \text{ м}^3/\text{мин}$$

$$n_{\text{кам}} = \frac{26,67 \cdot 2}{9 \cdot 0,8 \cdot 6,3} = 1,17$$

Принимаем 1 камеру.

Время перемешивания составит:

$$\tau = \frac{6,3 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 9}{26,67} = 1,7 \text{ мин}.$$

Рассчитаем объем контактного чана:

$$V_{\text{к.ч}} = \frac{V_{\text{мин}} \cdot \tau}{k \cdot n_{\text{сек}}}, \text{м}^3$$

где  $k$  - коэффициент заполнения камеры,  $k = 0,8$ ;  $\tau$  - время кондиционирования.

Определим объем контактного чана для кондиционирования пульпы с реагентами.

На контактирование поступает 900 м<sup>3</sup>/ч пульпы.

$$V_{\text{мин}} = \frac{900}{60} = 15 \text{ м}^3/\text{мин},$$

$$V_{\text{к.ч}} = \frac{15 \cdot 2}{0,8 \cdot 9} = 4,16 \text{ м}^3.$$

Принимаем к установке контактный чан КЧ-4 объемом 4,2 м<sup>3</sup>.

В работе представлены следующие расчеты:

Количество пульпы, поступающей в гидроциклон 1: 418, т/ч. Объем пульпы: 248,8 м<sup>3</sup>.

Количество пульпы, подаваемой в гидросепаратор 2: 182,82, т/ч. Количество нерастворимого осадка в руде после обесшламливания: 3,65 %;

Крупность зерна 68 мкм. Количество песков 30,5 т/ч. Количество слива 22,2 т/ч.

Нагрузка на песковую насадку 2,2 т/см<sup>2</sup>·ч. Количество воды, уходящей вместе со сливом

53 м<sup>3</sup>/ч. Общее количество воды в пульпе 66 м<sup>3</sup>/ч. Число камер, необходимых для проведения основной флотации 3,7, контрольной флотации 1,9 и перечистной флотации 1,17. Минутный объем пульпы 33,3 м<sup>3</sup>/мин. Время перечистки 1,7 мин.

Производительность гидросепаратора: 4,04 м<sup>3</sup>/с. Размер сливных отверстий для отсепарированных фаз 0,015 м. Угловая скорость вала 1,05 об/с. Приведенная сосредоточенная масса вала мешалки 210 кг. Касательное напряжение в опасном сечении вала 15 МПа. Расчетное давление внутри гидросепаратора 0,18 МПа.

#### Анализ результатов и выводы

В данной работе представлена подробная технологическая схема процесса обесшламливания калийной руды, проведено полное описание оборудования технологической линии, изучены физико-химические основы процесса классификации и сортировки частиц. Описаны физико-химические основы метода флотации, виды флотации, приведен анализ классификации оборудования.

На основе технологической схемы произведен расчет флотомашин: определено необходимое количество камер для основной, контрольной и перечистной флотации, рассчитано время флотации, объем контактного чана. Результаты расчета подтверждают возможность использования выбранного оборудования в заданных производственных условиях. Полученные данные могут быть применены при проектировании участка обесшламливания калийной фабрики.

При эксплуатации флотомашин необходимо регулярно проверять состояние лопаток импеллера и направляющих лопаток статора. Износ приводит к снижению аэрации и эффективности флотации. Для механической машины с кипящим слоем важно поддерживать равномерную аэрацию через решётку кипящего слоя и центральную трубу. Следить за отсутствием засорения воздушных патрубков. Не допускать переполнения или снижения уровня, чтобы избежать падения производительности и разрушения пенного слоя. Обеспечить непрерывное удаление минерализованной пены. При загустевании пены корректировать расход пенообразователя или скорость скребков.

Удалять отложения нерастворимого остатка, особенно с решётки кипящего слоя. Своевременно смазывать подшипники вала импеллера, проверять биение вала и натяжение ременных передач. Недопустима повышенная вибрация. При работе с агрессивной пульпой использовать герметизацию узлов, местную вытяжку над флотомашинной. Персонал должен быть обучен правилам остановки и экстренного отключения оборудования. Фактическое время флотации необходимо контролировать по расходу пульпы. При отклонениях корректировать производительность насосов или число работающих камер.

#### Список литературы:

1. Геологическая энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: [dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_geolog/3467/Обесшламливание](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/3467/Обесшламливание)
2. Ермолаева В.А., Грошев Д.Д. Изучение производства хлорида калия галургическим методом // Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral". - 2023. - № 1. - С. 228-243.
3. Обогащение полезных ископаемых: учебное пособие / сост. Пузыревская И.А. // Благовещенск: Изд-во АмГУ. - 2014. - 96 с.
4. Вишняк Б.А. О технологии обогащения и автоматизации процессов современной калийной флотационной фабрики / Б.А. Вишняк, А.А. Поздеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2012. - № 9. - С. 138-150.

5. Наумова Е.Р., Ермолаева В.А. Технология обесшламливания калийной руды // Наукосфера. - 2023. - № 3 (1). - С. 166-171.

**References:**

1. Geological Encyclopedia [Electronic resource]. Access mode: [dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_geolog/3467/Desliming](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geolog/3467/Desliming)
2. Ermolaeva V.A., Groshev D.D. Study of Potassium Chloride Production by Halurgical Method // International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral". - 2023. - No. 1. - Pp. 228-243.
3. Mineral Processing: A Textbook / Comp. Puzyrevskaya I.A. // Blagoveshchensk: AmSU Publishing House. - 2014. - 96 p.
4. Vishnyak B.A. On the Technology of Enrichment and Automation of Processes at a Modern Potassium Flotation Plant / B.A. Vishnyak, A.A. Pozdeev // Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). - 2012. - No. 9. - Pp. 138-150.
5. Naumova E.R., Ermolaeva V.A. Technology of Potassium Ore Sludge Removal // Naukosfera. - 2023. - No. 3 (1). - Pp. 166-171.