

## РЕЦИКЛИНГ СМЕТОК ЭЛЕКТРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

Н.В. Васюнина, И.В. Дубова, С.В. Белоусов, Н.А. Шарыпов

ГОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Красноярск

Предложен способ извлечения загрязняющих компонентов из сметок алюминиевого производства с целью дальнейшего возврата их в электролизер. Для обогащения материала предлагается следующая схема переработки: измельчение – классификация – обратная флотация – сгущение. В работе для наиболее полного удаления оксидов кремния и железа при флотации сметок используется флотореагент, представляющий собой смесь первичных жирных алкиламинов – Flotigam 7266 компании Clariant (Германия). Для удаления углеродных частиц использовалось сочетание соснового масла в смеси с керосином. Флотация проводилась на флотомашине ФМЛ 0,3. Исходный материал, камерный продукт и хвосты анализировались на содержание углерода и оксидов алюминия, железа и кремния с использованием рентгеноспектрального, рентгенофазового и химического методов анализа. Установлено, что переработка общей массы материала не позволяет получить продукт с приемлемым содержанием оксидов кремния и железа. Проведен фазовый анализ различных фракций исходного материала. Предлагается переработка фракций материала, содержащих минимальное количество загрязняющих веществ (углерода, оксидов кремния и железа). На основании проведенного рентгеноспектрального анализа (РСА) различных фракций материала для переработки методом флотации были выбраны две фракции: фракция +5 мм и фракция -0,071 мм. В результате переработки глиноземсодержащей фракции материала (-0,071 мм) получен камерный продукт требуемого качества. При переработке крупной электролитсодержащей фракции (+5,0 мм) получен продукт с высоким содержанием глинозема и фторсодержащих компонентов при небольшом содержании углерода и оксида железа, но значительном содержании оксида кремния. Дальнейшее использование данного продукта возможно для получения алюмокремниевых сплавов.

**Ключевые слова:** глиноземсодержащие отходы, сметки, электролитическое получение алюминия, флотация сметок, очистка сметок, рециклинг

The paper considers the possibility of processing and returning to the production of one type of solid alumina-containing waste of the aluminium production, which are named sweepings. Concentration of the sweepings is carried by flotation. Flotigam 7266 (Clariant, Germany) was selected as a flotation reagent. When flotation kerosene and pine oil were injected to transform carbon into the tails. Tests were conducted on flotation machine FML 0.3. The controllable parameters in the result of the flotation are the output of the section product, and recovering C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and F in the section product. To control the elemental and phase of the composition used X-ray diffraction and chemical analysis. The choice of fractional composition of material was carried out on the basis of the RSA of various fractions of material. For recycling as flotation method were chosen two fractions: the fraction +5 (with the greatest number of the electrolyte-containing materials and with the smallest content of oxides of silicon and iron) and the fraction of -0,071 mm, which contain alumina (generally) and the minimum quantity of oxides of iron and silicon. Chamber product of acceptable quality was received as a result of the flotation processing of electrolyte-containing fraction (-0,071 mm). The product with the high content of alumina and fluorinated components in the presence of the small content of carbon and oxide of iron, but significant contain of oxide of silicon was

received with processing of the large electrolyte-containing fraction (+5,0 mm). Further use of this product is possibly for receiving the Silicon-aluminum alloys.

**Key words:** alumina-containing waste, sweepings, electrolytic aluminum production, flotation of sweepings, cleaning of sweepings, recycling

### **Введение**

В современном мире алюминий за счет своих универсальных свойств занимает второе место после стали по использованию в строительстве, транспорте, электротехнике, упаковке и других отраслях. Глобальный спрос на алюминий непрерывно растет и ежегодное мировое производство алюминия по состоянию на 2014 превышает 49 млн. тонн [1]. По оценкам [2] глобальный спрос на алюминий к 2050 году увеличится еще в 2-3 раза. В России алюминиевая промышленность является стратегически важной отраслью экономики.

При получении алюминия электролизом криолитоглиноземного расплава образуются тысячи тонн отходов, проблема утилизации которых актуальна по причинам экологического, технологического и экономического характера. Установлено, что количество твердых отходов составляет 25–27 % от объема производства алюминия. При этом доля отходов и выбросов электролизного производства, относящихся к 2–4-му классам опасности, в несколько раз превосходит глиноземный передел [3].

Образование и накопление такого количества отходов вызывает как проблему их размещения, так и проблему вторичного использования ценных ресурсов. Ежегодный объем складирования отходов на шламовых полях алюминиевых заводов Сибирского федерального округа (Иркутского, Братского, Красноярского и Новокузнецкого) превышает 70 тыс. т. На сегодня шламовые поля близки к заполнению, а организация новых полей является труднореализуемой задачей из-за отсутствия свободных площадей в непосредственной близости от заводов и существенных финансовых затрат. Кроме того, это и серьезная экологическая проблема, что вызывает ужесточение политики Правительства Российской Федерации в области образования и складирования отходов.

Среди основных видов отходов, характерных для электролизного производства алюминия (рис.1), можно выделить пыль электрофильтров, шламы газоочистки, хвосты флотации, отработанную катодную футеровку электролизеров, а также отходы пылеуборочных машин (ПУМ), называемые «сметки» (глинозем и оборотный электролит, собранный с нулевой отметки корпусов электролиза). Большинство перечисленных отходов содержат ценные компоненты, что повышает актуальность их рециклинга.

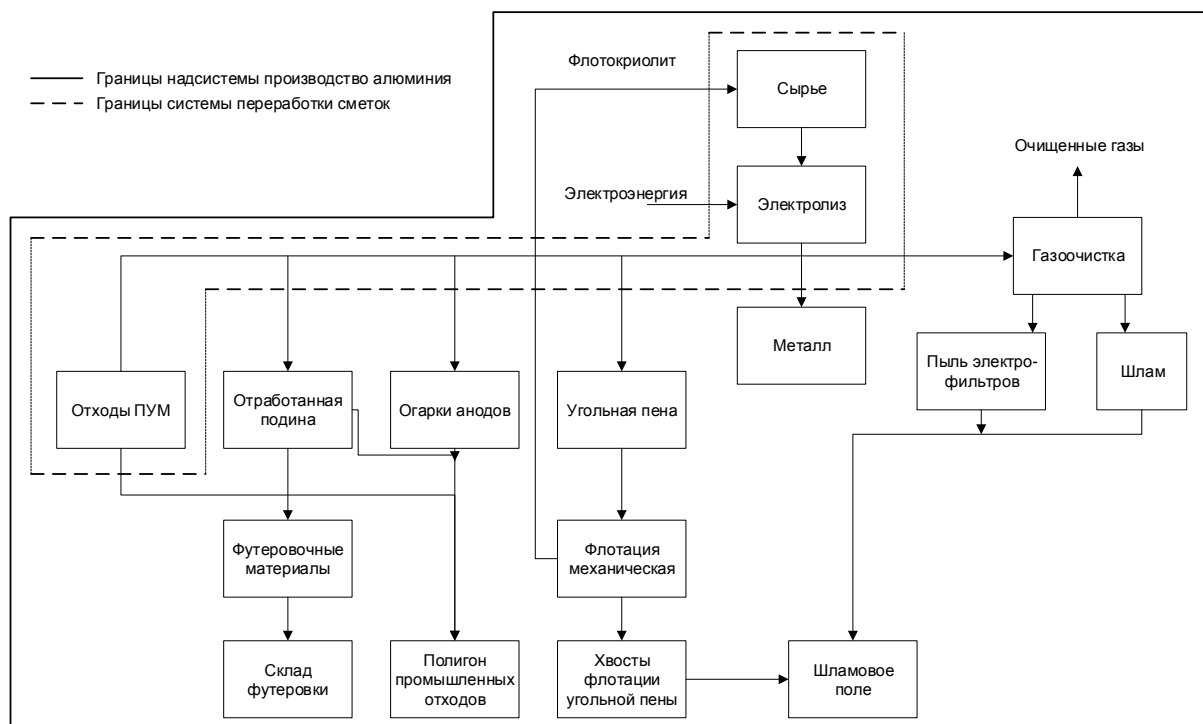


Рисунок 1 – Схема отходов алюминиевого производства

## Обзор литературы

Проблемой переработки отходов электролитического получения алюминия занимаются многочисленные российские и зарубежные исследователи [3-15] в поиске наиболее эффективных, простых и экономичных методов. В опубликованных работах предлагается комплекс методов и подходов, таких как нейтрализация отходов и последующее их хранение на шламовых полях, получение различных добавок для сталелитейной и цементной промышленности, производства керамики [4]. Для извлечения ценных компонентов предлагаются обжиг, щелочное или кислотное выщелачивание, флотация, пиро-гидролиз или пиросульфолит [4-5].

В ряде зарубежных публикаций [6-9] технологию производства алюминия авторы анализируют с позиций системного подхода. Все промежуточные стадии этой технологии, включая добычу бокситов, производство глинозема, получение первичного алюминия электролизом (с учетом производства анодов и получения расплава), первичное литье в слитки представляют собой отдельные подсистемы единой комплексной системы. Определение границ системы и подсистем зависит от цели, которую необходимо достичь. Целостное мышление (Life System Thinking) позволяет проанализировать и оценить потребление энергии и материалов, выбросы и управление отходами в течение полного жизнен-

ного цикла производства алюминия (Life Cycle Assessment of Aluminum Production) [7-8]. Из-за размера и сложности процесса производства алюминия важно на каждом этапе акцентировать внимание на входных ресурсах (материалах и энергии) и результатах (побочных продуктах и / или выбросах) [9].

Процесс производства алюминия имеет множество связей разного характера (взаимовлияния внутренних и внешних параметров, положительные и отрицательные обратные связи и др.). В рамках данной работы целью-направлением является рециклинг отходов алюминиевого производства, а целью-результатом схема переработки отходов ПУМ (сметок). Для достижения поставленной цели-результата установлены границы рассматриваемой системы (рециклинг сметок).

Комплексные технологические схемы для переработки отходов, разработанные с учетом системного подхода, позволят учесть оптимальную логистику производства, энерго- и ресурсосбережение, а для предприятий внедрение подобных схем повысит конкурентное преимущество. Технологические схемы комплексной переработки фтор-, глинозёмсодержащих отходов производства алюминия приводятся в ряде работ [10-15].

До недавнего времени переработке глинозёмсодержащих отходов ПУМ (сметок) не уделялось достаточного внимания, лишь в единичных работах исследовалась данная проблема [10-12], но с учетом ужесточения экологических и экономических требований алюминиевые заводы используют любые возможности снижения себестоимости производства, и номенклатура перерабатываемых отходов постоянно расширяется.

В работах исследователей из Таджикистана предлагается в комплексной схеме переработке смешивать сметки с углеродсодержащими отходами при их дальнейшей переработке [13-15]. Авторами [10-11] с целью переработки вторичного глинозёмсодержащего сырья и возврата его обратно в производство предложена технологическая схема с использованием гравитационно-магнитного обогащения с предварительным удалением фракций, имеющих большое содержание кремния и кальция. В то же время, в цитируемых работах отмечено, что данная технологическая схема не позволила достигнуть требуемых показателей по  $\text{SiO}_2$  (0,3 %) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,2 %). После проведения дополнительных исследований в технологическую схему добавлены способы сухой гравитации на воздушных классификаторах

В опубликованных ранее авторами данной статьи исследованиях [12] отмечено, что очистить общую массу сметок от загрязняющих примесей до приемлемого уровня содержания примесей не представляется возможным. Единственным технологически возмож-

ным способом очистки материала является отсев и переработка наиболее «богатых» фтор- и глиноземсодержащих фракций с наименьшим содержанием оксидов кремния и железа.

### Материалы и методы

В работе предлагается разработка технологической схемы переработки отходов ПУМ (сметок) алюминиевого производства с целью дальнейшего возврата их в электролизер. При работе пылеуборочных машин (ПУМ) на ОАО «РУСАЛ Красноярск» образуется до 5000 т в год глиноземсодержащих отходов, непригодных к вторичному использованию в процессе электролиза. Исследованию подвергали две различных партии сметок. Для наиболее полного удаления оксидов кремния и железа было проведено флотационное обогащение сметок предварительно разделенных по фракциям. В качестве флотореагента использовали Flotigam 7266 компании Clariant (Германия), представляющий собой смесь первичных жирных алкиламинов. Флотация проводилась на флотомашине ФМЛ 0,3. Для удаления углеродных частиц использовалось сочетание соснового масла в смеси с керосином. Химический и фазовый состав исходного материала, камерного продукта и хвостов (содержание углерода и оксидов алюминия, железа и кремния) проводили с использованием рентгеноспектрального, рентгенофазового и химического методов анализа.

### Полученные результаты

На основании проведенного рентгеноспектрального анализа (РСА) определено, что не весь материал ПУМ целесообразно использовать для переработки. Флотационному обогащению были подвергнуты выбранные фракции сметок ПУМ: фракция +5,0 мм (с наибольшим количеством электролитсодержащих материалов и наименьшим содержанием оксидов кремния и железа) и фракция -0,071 мм (в основном содержащая глинозем). Краткие результаты исследования представлены в табл. 1 (более подробно результаты описаны в работе [12]).

Таблица 1 – Параметры очистки сметок пылеуборочных машин (ПУМ)

Параметр	Фракция мм	
	+5,0	-0,071
Количество образующихся отходов ПУМ, т/мес. (кг/ч)	420,0 (575,3 кг/ч)	
Доля фракции в материале, % масс.	6,37	20,00
Количество перерабатываемого материала, т/мес. (кг/ч)	26,8 (36,7)	84,0 (115,1)
С учетом 50% запаса по производительности	40,2 (55,1)	126,0 (172,7)
Содержание, % масс. в исходном материале:		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,99	65,81
SiO <sub>2</sub>	3,69	1,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,53

C	5,4	3,4
F	18,04	3,81
Выход камерного продукта, %	35,8	45,6
Содержание, % масс. в материале после основной флотации:		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,21	89,6
SiO <sub>2</sub>	0,98	0,35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,18
C	1,9	2,6
F	32,05	5,21
Количество получаемого продукта, т/мес.	9,6	38,3
Удельная норма расхода сырья на производство флотационного криолита и глинозема при совместной переработке, т/т	8,77	
Удельная норма расхода сырья на производство флотационного криолита и глинозема соответственно, т/т	43,75	10,97

На основании полученных результатов предлагается аппаратурно-технологическая схема, согласно которой необходима классификация поступающей партии сметок на фракции:

- крупная фракция +5,0 мм, которую в связи с малым ее содержанием в материале, а также малой концентрацией оксида железа в ней возможно подавать далее на совместную переработку с угольной пеной для производства флотационного криолита по схеме, функционирующей на сегодняшний день в цехах производства фтористых солей (ЦПФС) большинства алюминиевых заводов;

- мелкая фракция -0,071 мм, которая поступает на отдельную линию флотации для получения сырья с содержанием глинозема около 90 % масс. и фторидов (в пересчете на элементный фтор) около 5,2 % масс. Для дополнительной очистки получаемого продукта от углерода и оксидов железа и кремния предлагается использование перечистой флотации;

- фракция (-5,0—+0,071) мм переработке не подлежит и направляется в отвал.

Для низкокачественного материала (с большим содержанием углерода, оксидов кремния и железа, бытового мусора, малым содержанием глинозема и фторсодержащих компонентов материала) в ходе исследований не был определен режим флотации, позволяющий получить камерный продукт приемлемого качества. Элементный и фазовый анализы поступившего материала заставляют предположить, что его переработка любыми методами очистки (магнитной или электросепарацией, аэродинамическими методами или разделением в тяжелых суспензиях) не позволят получить продукт, пригодный для использования при электролизе алюминия. Поэтому предлагается введение входного контроля перед переработкой поступающего материала на содержание в нем кремния и желе-

за, а также его фазовый состав с целью исключения попадания в материал отработанной футеровки или большого количества других сторонних примесей. Таким образом, необходимым условием является входной контроль качества поступающего материала с установленными пределами по исходному содержанию в нем оксидов алюминия, железа, кремния, углерода и элементного фтора.

### **Описание аппаратурно-технологическая схема получения флотационного глинозема из сметок ПУМ**

Аппаратурно-технологическая схема получения флотационного глинозема из сметок ПУМ представлена на рис. 2, предлагаемое оборудование для ее оснащения в табл. 2. В связи с небольшими объемами перерабатываемого материала предлагается следующая опытно-промышленная линия.

1. Подготовка сметок ПУМ к флотации. Сметки автомашинами завозят в приемный бункер (поз.4), из которого вибропитателем (поз.5), а далее ленточным конвейером (поз.6) подаются на вибрационное сито (поз.7), на котором производится рассев материала на три фракции: +5,0; -5,0—+0,071; -0,071 мм. На ленточном конвейере улавливается металлический лом металлоотделителем (поз.8).

Крупную фракцию подают далее на существующую линию переработки угольной пены. Возможен вариант также ее использования при производстве флотационного глинозема после предварительного измельчения. Средняя фракция поступает в отвал. Мелочь подается конвейером (поз.6) в мешалку-зумпф (поз.9), куда также подается техническая вода, а также вода с перечистой и контрольной флотации. Далее суспензия центробежным насосом (поз.10) подается на передел флотации. Работа узла подготовки суспензии определяется следующими параметрами: весовое отношение Т:Ж=1:10; дозировка мелочи сметок в мешалку - 115 кг/ч (по весоизмерителю или визуально). Весовое отношение Т:Ж обеспечивают регулировкой подачи воды. Регулировку осуществляют вручную вентилям).

Также необходимо периодическое проведение отбора проб, проведение испытания на гранулометрический и химический составы каждой пробы, содержание в ней влаги.

2 .Флотация сметок. Процесс флотации ведут во флотационной машине (поз. 11) в три стадии (рекомендуется применить после основной флотации): основная флотация; перечистная флотация; контрольная флотация. В качестве флотореагентов используют амин Flotigam 7266, керосин и сосновое масло. В результате флотации в каждой стадии получают два продукта - пенный и камерный.

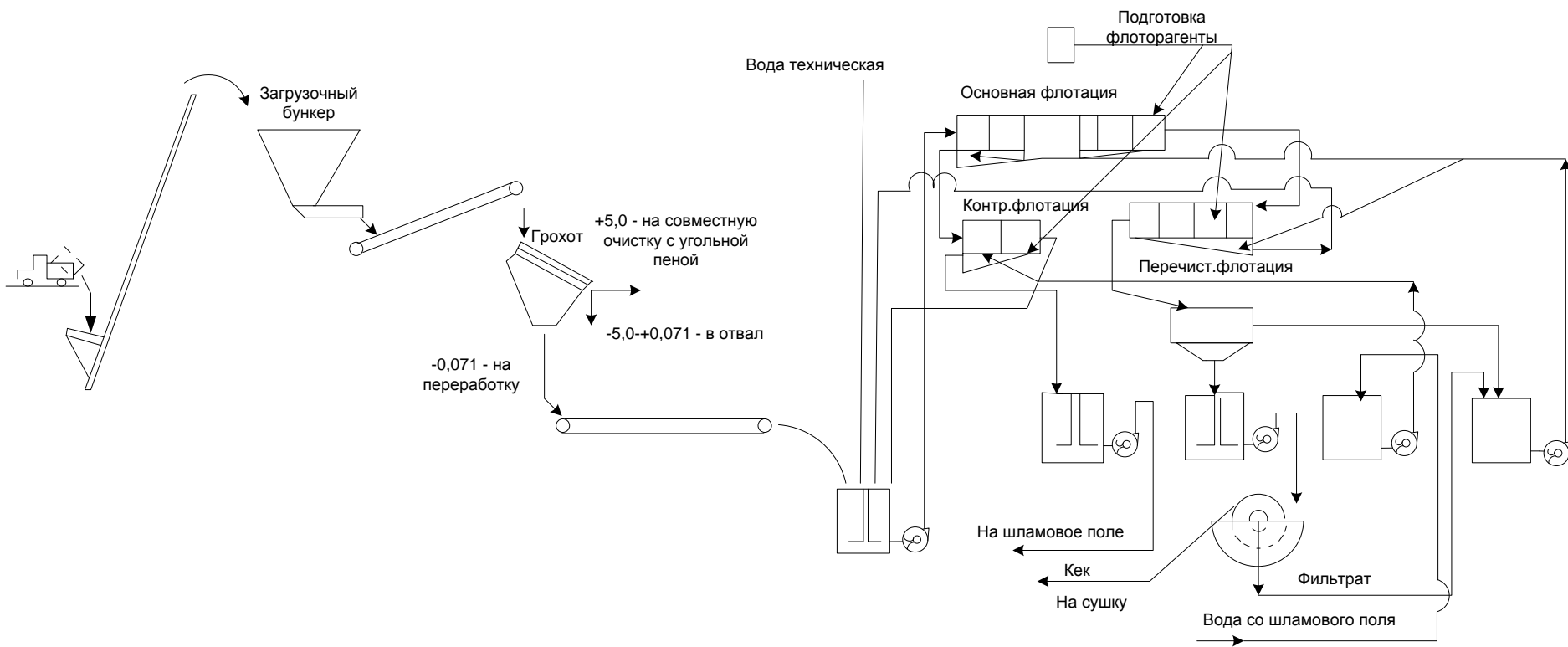


Рисунок 2 – Аппаратурно-технологическая схема получения флотационного глинозема из сметок ПУМ



Основную флотацию проводят в 10-ти камерах флотомашин. Получают два продукта: камерный продукт (поступает на перечистку) и пенный продукт (поступает на контрольную флотацию). Перечистную флотацию проводят в 6 камерах флотомашин. Получают два продукта: камерный продукт – фторсодержащий глинозем (поступает на сгущение) и пенный продукт - промпродукт I (поступает обратно в мешалку-зумпф).

Пенный продукт основной флотации перед контрольной флотацией подвергают перемешиванию в первых четырех камерах флотомашин для разрушения пены с целью снижения потерь фтора. В этих камерах должны быть сняты пеногоны, закрыты воздухозаборные патрубки импеллеров.

Контрольную флотацию пенного продукта основной флотации проводят в 4 камерах флотомашин. Получают два продукта: камерный продукт - промпродукт II (поступает обратно в мешалку-зумпф) и пенный продукт - хвосты отвальные (откачивают насосами (поз.12) на шламоотвал).

### 3. Сгущение флотационного глинозема

После перечистой флотации камерный продукт поступает в сгустители (поз.13). В результате сгущения получают два продукта: сгущенный флотационный глинозем (подаётся насосами поз.12 на фильтрацию) и слив сгустителя (откачивают насосами поз.12 в бак осветленной воды).

### 4. Фильтрация глинозема

Сгущенный глинозем поступает в мешалку, перемешивается и нагревается. Из мешалки пульпу насосами перекачивают в барабанные вакуум-фильтры (поз.14). После фильтрации флотационного глинозема получают два продукта: кек (направляют на сушку в сушилку, поз. 15) и фильтрат.

### 5. Сушка флотационного глинозема

Сушка глинозема осуществляется в сушилке барабанной или полочных с подогревом под паром (электроподогревом). Отфильтрованный глинозем (кек) с влажностью до 20% поступает по течке самотёком в сушилку барабанную (поз.15). Готовый продукт ленточным конвейером и вертикальным быстроходным ленточным элеватором транспортируется в силос готовой продукции (поз.16). Из силоса погрузка глинозема автотранспортом, которым продукт вывозят в склады глинозёма и корпуса электролиза.

**Параметры процесса.** Для разработанной аппаратурно-технологической схемы переработки сметок основным процессом является флотация. В работе был проведен анализ технологических процессов с точки зрения управления, определены параметры про-

цесса флотации и связи между ними (рис. 3), что послужило основой для технологического управления и базой для разработки АСУ ТП флотационного отделения.



Рисунок 3 – Параметры процесса флотации

**Сырьё и материалы.** В производстве флотационных криолита и глинозема по предлагаемой технологической схеме применяются:

1. Сырьё:

- Сметки ПУМ
- Пена угольная ТУ 48-0109-24-92
- Флотигам Flotigam 7266
- Керосин осветительный ОСТ 38.01407-86
- Масло сосновое флотационное синтетическое ТУ 13-00281074-263-95
- Мазут топочный марки "100", малозольный ГОСТ 10585-99

2. Материалы:

- Шары стальные мелющие для шаровых мельниц ГОСТ 7524-89
- Ткань фильтровальная неотделанная для вакуум-фильтров ТУ 8288-125-00321098-96  
Арт.86033
- Проволока из углеродистой конструкционной стали для вакуум-фильтров ГОСТ 17305-91

**Хранение сырья.** Сырьё, предназначенное для производства флотационного криолита и глинозема из сметок ПУМ, должно храниться в складе сырья (баки хранения соснового масла флотационного, баки для приготовления и хранения смеси реагентов керосина и соснового масла, герметичный бак для хранения Flotigam 7266, бак для приготовления раствора Flotigam 7266 концентрации 50 г/т, насос реагентов).

**Разгрузка сырья.** Керосин и масло сосновое флотационное доставляют в специализированном автотранспорте и сливают в приемные емкости (табл. 6.2, поз.1). Flotigam

7266 хранят в герметичных контейнерах (поз.2). Для приготовления флотореагентов: в бак на 10 частей керосина 1 часть соснового масла и перемешивать сжатым воздухом; для приготовления Flotigam 7266 необходимо в мешалке (поз.3) использовать горячую (около 80 °С) воду, в которой расплавлять амин в необходимом количестве, затем перемешивать.

Мазут в цистернах поступает на мазутохранилище завода и далее по трубопроводу, снабженным спутником (давление пара 8 атм, T-270°C), подается в топку сушильного барабана. Давление мазута – 4,0 – 8,0 кгс/см<sup>2</sup>. Температура мазута не менее 80°C.

### **Основные выводы по работе**

1. В работе предложена аппаратурно-технологическая схема переработки сметок ПУМ: мелкая фракции -0,071 мм поступает на отдельную линию флотации для получения сырья с содержанием глинозема около 90 % масс. и фторидов в пересчете на элементный фтор около 5,2 % масс. Для дополнительной очистки получаемого продукта от углерода и оксидов железа и кремния предлагается использование перечистой флотации.

2. Необходимым условием является входной контроль качества поступающего материала с установленными пределами по исходному содержанию в нем оксидов алюминия, железа, кремния, углерода и элементного фтора.

3. Выделены основные параметры флотации сметок, важные как с точки зрения технологического управления, так и с точки зрения построения АСУ ТП флотации отходов ПУМ.

### **Список использованных источников**

1. U.S. Geological Survey, Retrieved on-line on 20th February, 2017 [http:// minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminum/mcs-2015-alumi.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminum/mcs-2015-alumi.pdf).

2. World Aluminium, 2015. <http://www.world-aluminium.org/statistics/#data>.

3. Патрин, Р.К., Сизяков, В.М., Бажин, В.Ю. Перспективы пирометаллургической переработки техногенных отходов алюминиевого производства. // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2013. - № 6. – с.61-63.

4. Kondrat'ev, V.V., Rzhechitskii, E.P., Shakhrai, S.G. et al.. Recycling of electrolyzer spent carbon-graphite lining with aluminum fluoride regeneration // Metallurgist. – 2016.- Vol. 60 – p. 571-575. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0333-4>

5. Abdrakhimov, V. Z. Use of aluminum-containing waste in production of ceramic materials for various purposes // Refractories and Industrial Ceramics. – 2013. – Т. 54. – №. 1. – С. 7-16.

6. Nour Attia, Kareem M. Hassan, and Mohamed I. Hassan Environmental Impacts of Aluminum Dross After Metal Extraction. // LM. – 2018. - pp 1155-1161.
7. Satish Reddy, M. & Neeraja, D. Aluminum residue waste for possible utilisation as a material: a review.// Sādhanā. – 2018. - 43: 124. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0866-2>  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-018-0866-2#enumeration>
8. Cremiato, R., et al. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production. // Renewable Energy. – 2017.-  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.033>
9. Haraldsson, J., Johansson, M. Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminium industry – From electrolysis to recycling. // Renewable & sustainable energy reviews. – 2018.- 93.- p. 525-548.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.043>
- 10.** Барахтенко, В. В., Бурдонов, А. Е., Зелинская, Е. В., Волянский, В. В., Гавриленко, А. А. Очистка некондиционного глиноземсодержащего продукта для использования в производстве алюминия./ В. В. Барахтенко, А. Е. Бурдонов, Е. В. Зелинская, В. В. Волянский, А. А. Гавриленко /. Материалы XXIII Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», 2018. . Издательство: Издательство "Форт Диалог-Исеть" (Екатеринбург), с.201-204
11. Максимова, М.А. Разработка способа извлечения загрязняющих компонентов из глиноземсодержащего сырья при производстве алюминия // XXI век. Техносферная безопасность. - 2016.- Т. 1. - № 3.- С. 53–64.
12. Vasyunina, N. V., Belousov, S. V., Dubova, I. V., Morenko, A. V., Druzhinin, K. E. Recovery of Silicon and Iron Oxides from Alumina-Containing Sweepings of Aluminum Production. // Russian journal of non-ferrous metals. – 2018. - Vol. 59. - Is. 3. - p. 230-236
13. Рузиев, Д. Р. Физико-химические и технологические основы комплексной переработки отходов алюминиевого производства и алюмосиликатного сырья / Д. Р. Рузиев/ Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.- Душанбе – 2009.
14. Раджабов, Ш. Х., Шоев, И. С., Мухамедиев, Н.П., Рузиев, Дж. Р., Сафиев, А. Х., Бобоев, Х. Э., Мирпочаев, Х. А. Комплексная переработка фтор-, глинозёмсодержащих отходов производства алюминия. // Доклады академии наук республики Таджикистаню – 2014. – Т. 57. - №1. - с.51-55.

15. Сафиев, Х., Кабиров, Ш.О., Азизов, Б.С., Мирпочаев, Х.А., Рузиев, Дж. Р., Бобоев, Х.Э., Раджабов, Ш.Х. Технология получения криолита и фторида алюминия из глинозём-, фторсодержащих отходов производства алюминия.// Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2011.- Т. 54. - №10. - с. 845-850.