

ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.928.44: 622.7.091

[https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)

Лаговская Е.В., Фидаров Б.Ф., Глубокова Л.Г.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СГУСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье обобщены типовые причины нестабильной работы сгустителей: нестационарность питания, нарушения флокуляционного режима и условий смешения, колебания границы раздела фаз, гидродинамические циркуляции, реологические осложнения осадка, перегрузки и износ механической части. Выделены направления совершенствования: повышение удельной производительности аппаратов, переход к более плотным режимам сгущения, интенсификация осаждения за счёт модернизации узлов подачи и распределения, повышение качества реагентной подготовки и дозирования, усиление и диагностика приводов и скребковых механизмов, развитие комплексного контроля и автоматизации на основе расширенного набора измерений и анализа данных. Показано, что для предприятий Арктической зоны критичны устойчивость режима, снижение эксплуатационных рисков и воспроизводимость качества осветлённого слива и сгущённого продукта при ограниченных ремонтных ресурсах, высокой стоимости простоев и повышенной цене отклонений технологического режима.

Ключевые слова: сгущение, сгуститель, пульпа, флокуляция, осветлённый слив, хвосты, реология, водооборот, надёжность

В современных условиях горно-металлургические предприятия сталкиваются с необходимостью одновременного увеличения объёмов переработки минерального сырья, повышения эффективности водооборота и обеспечения стабильного качества осветлённого слива. Актуальность совершенствования сгустительного оборудования усиливается в связи с переходом крупных промышленных объектов к системе комплексных экологических разрешений, внедрением принципов наилучших доступных технологий, развитием производственного экологического контроля и повышением экономической значимости экологических отклонений. В этих условиях качество осветлённого слива, содержание взвешенных веществ, объём возврата оборотной воды, характеристики сгущённого продукта и стабильность хвостовых потоков становятся не только технологическими, но и экологически значимыми показателями, влияющими на выполнение установленных нормативов, расчёт платы за негативное воздействие на окружающую среду и снижение риска применения повышающих коэффициентов и административных санкций [1–5].

Процесс сгущения в горнодобывающей и горно-металлургической промышленности связан с обезвоживанием технологических пульп и разделением их на осветлённый слив и сгущённый продукт. Актуальность совершенствования процессов сгущения определяется не только ростом объёмов переработки минерального сырья и увеличением нагрузки на действующее оборудование, но и усилением требований к экологической устойчивости промышленных производств. Для крупных горно-металлургических предприятий качество

водооборота, содержание взвешенных веществ в осветлённом сливе, объём возврата воды, стабильность хвостовых потоков и характеристики размещаемых отходов приобретают значение показателей, связанных с выполнением условий комплексного экологического разрешения, программ производственного экологического контроля и требований наилучших доступных технологий. Поэтому вынос тонкодисперсной твёрдой фазы в слив следует рассматривать не только как технологический дефект работы сгустителя, но и как фактор, способный нарушать водно-реагентный режим последующих операций, увеличивать нагрузку на хвостовое хозяйство и повышать экологические и финансовые риски предприятия.

Сгущение технологических пульп – ключевая операция разделения твёрдой и жидкой фаз, обеспечивающая получение осветлённого слива и сгущённого продукта. Данная операция осуществляется на сгустителе (рис. 1), под которым будем понимать технологический аппарат непрерывного действия, в котором пульпа разделяется на два потока: осветлённый слив и сгущённый продукт. При этом с технологической точки зрения внутри сгустителя выделяют несколько основных зон: зону осветления, зону свободного осаждения, зону стеснённого (затруднённого) осаждения и зону уплотнения. Следует отметить, что при переработке пульп повышенной концентрации зона свободного осаждения может быть выражена слабо либо практически отсутствовать.

Зона осветления располагается в верхней части сгустителя, где содержание твёрдого минимально. Непосредственно в этой части через кольцевой сливной желоб (поз. 6) отводится осветлённая вода, то есть осуществляется слив (см. рис. 1). Обычно такой

слив относится к оборотной воде и повторно возвращается в производственный процесс. Осветлённый слив может быть чистым или замутнённым и характеризуется следующими показателями (табл. 1): содержание взвешенных веществ / мутность; стабильность качества слива во времени; отсутствие выноса осадка и переливов.

зание взвешенных веществ / мутность; стабильность качества слива во времени; отсутствие выноса осадка и переливов.

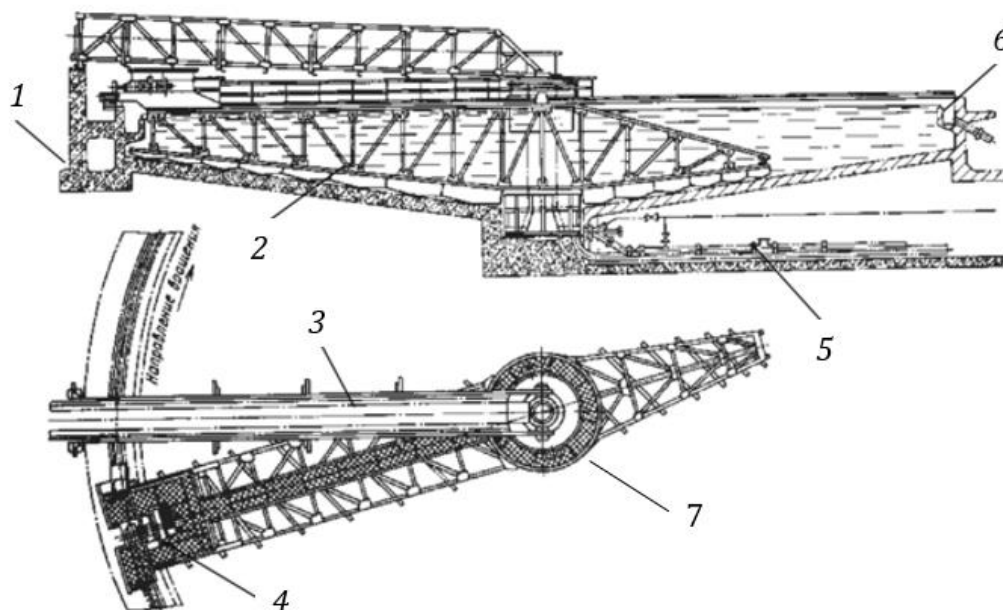


Рис. 1. Схема радиального сгустителя с периферическим приводом:

- 1 – корпус сгустителя (чан); 2 – вращающаяся ферма с гребковыми устройствами (граблями); 3 – желоб для подачи исходной суспензии; 4 – привод; 5 – трубопровод для сгущенного продукта; 6 – желоб для слива; 7 – центральный разгрузочный конус

Таблица 1

Показатели качества осветлённого слива, сгущенного продукта и устойчивости разгрузки

Показатель	Единицы / форма	Способ измерения	Значение для эффективности
Содержание взвешенных веществ / мутность	мг/л; НТУ	Онлайн-мутномер/анализатор взвеси; лабораторный анализ проб	Пригодность воды для возврата в оборот; соответствие экологическим требованиям; индикатор качества разделения фаз
Стабильность качества слива во времени	разброс/σ; % времени в допуске	Статистика онлайн-измерений (мутность/взвесь), контрольные пробы	Устойчивость режима при нестационарном питании и изменениях реагентной обработки; снижение рисков «просадок» качества
Отсутствие выноса осадка и переливов	события/частота; % времени без нарушений	Журналы аварий/сигнализаций; визуальный контроль; мониторинг уровня и мутности	Признак правильной гидродинамики и работы зоны питания/осветления; предотвращение загрязнения оборотной воды
Плотность (концентрация твёрдого) сгущённого продукта	мас. %; г/л; т/м³	Плотномер (радиометрический/вибрационный), пробоотбор и анализ; расчёт по расходам	Условия перекачивания и последующего обезвоживания/укладки; показатель глубины обезвоживания на стадии сгущения
Стабильность плотности сгущённого продукта	разброс/σ; % времени в допуске	Статистика плотномера + подтверждение пробами	Связь со стабильностью насосного режима, фильтрации/укладки; снижение вероятности нештатных режимов
Реологические свойства (прежде всего предел текучести)	Па (предел текучести); усл. вязкость	Лабораторная/цеховая реометрия; косвенные оценки по давлению/расходу в трубопроводе и нагрузке привода	Критерий «паста/не паста», энергозатраты на транспорт, риск «пробок», неустойчивой разгрузки и перегрузки механизма
Устойчивость разгрузки (выдачи)	коэффициент вариации расхода; частота остановов/«провалов»	Расходомер и плотномер; журналы событий; давление на линии	Надёжность работы насосов и трубопровода; воспроизводимость подачи на следующую стадию

В связи с этим качество осветлённого слива является одним из наиболее чувствительных показателей работы сгустителя. При повышении производительности аппарата возрастает риск выноса тонкодисперсной твёрдой фазы в слив, особенно при колебаниях расхода питания, изменении гранулометрического состава пульпы, нарушениях дозирования флокулянта и нестабильном положении границы раздела фаз. Поэтому практически значимым является такой режим работы, при котором аппарат способен перерабатывать повышенный объём пульпы без ухудшения качества осветлённой воды и без нарушения устойчивости разгрузки сгущённого продукта.

Ниже зоны осветления располагается **зона свободного осаждения**, в которой частицы пульпы осаждаются независимо друг от друга и не оказывают существенного взаимного влияния. По мере увеличения концентрации твёрдого формируется **зона стеснённого осаждения**. В средней части чана сгустителя частицы начинают взаимодействовать между собой и осаждаются как единая структурированная система. Скорость их движения снижается и формируется граница раздела фаз, отделяющая относительно разреженную часть пульпы от более плотной. Положение данной границы является важным параметром контроля процесса сгущения.

В нижней части аппарата располагается **зона уплотнения**, в которой под действием веса вышележащих слоёв происходит сжатие и дополнительное уплотнение осадка. Граблины вращающейся фермы (поз. 2 на рис. 1) перемещают уплотнённый материал, иначе называемый сгущённым продуктом, к разгрузочному конусу (поз. 7), откуда он выкачивается насосами. Сгущённый продукт подвергается дальнейшей переработке или складированию. Плотность сгущённого продукта достигает 60-70% твёрдого по массе и характеризуется такими показателями (см. табл. 1), как: плотность (концентрация твёрдого) сгущённого продукта; стабильность плотности сгущённого продукта; реологические свойства (прежде всего предел текучести); устойчивость разгрузки (выдачи).

Особое внимание следует уделить реологическим свойствам сгущённого продукта. Под реологи-

ческими свойствами понимаются характеристики течения и деформации суспензии под действием внешних нагрузок. В отличие от ньютоновских жидкостей, сгущённые пульпы относятся к структурированным дисперсным системам и проявляют неньютоновское поведение. Для них характерно наличие предела текучести – минимального напряжения, необходимого для начала течения, а также зависимость вязкости от скорости сдвига. По мере увеличения концентрации твёрдого фаза приобретает выраженные пластические свойства, что существенно влияет на транспортировку, перекачивание и разгрузку материала. Контроль реологических параметров необходим для предотвращения перегрузки сгребающего механизма, образования застоев в трубопроводах, нестабильной работы насосов и нарушения режима сгущения в целом. Таким образом, реология является не только характеристикой качества сгущённого продукта, но и важным фактором надёжности и энергоэффективности всего технологического процесса.

В зависимости от места сгустителя в технологической схеме сгущённый продукт направляется либо на дальнейшие переделы (как носитель ценного компонента), либо в хвостовое хозяйство. В технологических схемах горнодобывающих и горно-обогатительных предприятий их располагают в нескольких типовых местах, представленных на рис. 2 [1, 6].

Разделение фаз происходит за счёт гравитационного осаждения частиц и последующего уплотнения осадка. Эти процессы распределены по высоте аппарата и определяют формирование осветлённого слива и сгущённого продукта. Следовательно, результат работы сгустителя определяется не одной характеристикой, а совокупностью свойств пульпы и технологических параметров режима [1].

Скорость осаждения частиц в пульпе определяется их размером, плотностью, концентрацией твёрдой фазы, вязкостью жидкой среды и физико-химическими свойствами поверхности частиц. Повышение температуры, как правило, снижает вязкость жидкости, что может способствовать увеличению скорости осаждения.

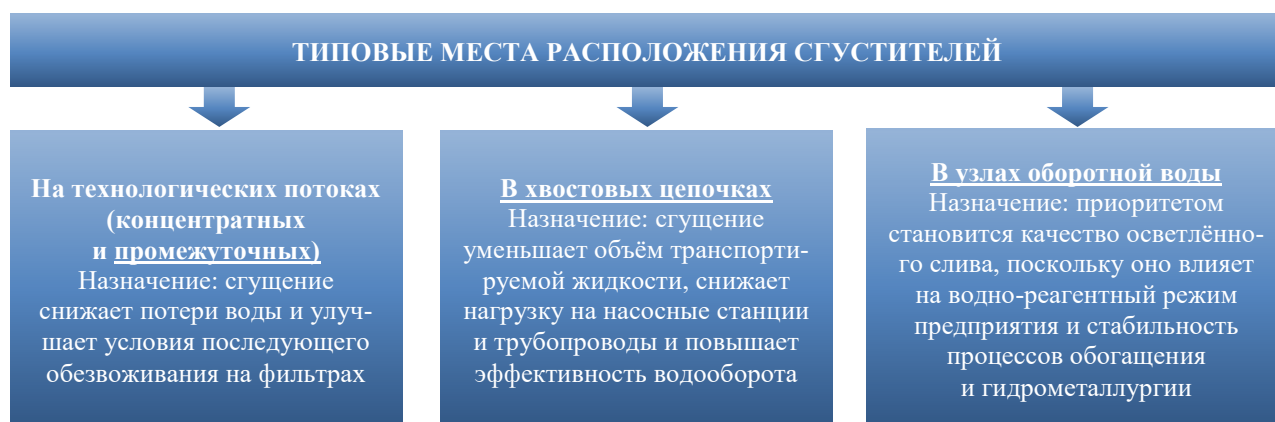


Рис. 2. Типовые места расположения сгустителей на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях

В зависимости от дисперсности и электрического состояния поверхности частицы могут осаждаться как раздельно, так и в виде агрегатов. Для интенсификации процесса осаждения в промышленности применяются реагенты – коагулянты и флокулянты. Коагулянты способствуют снижению электрического заряда частиц и уменьшению их взаимного отталкивания, тогда как флокулянты адсорбируются на поверхности частиц и формируют между ними пространственные (мостиковые) связи, образуя укрупнённые агрегаты – флокулы. Образование флокул приводит к увеличению эффективного размера частиц и ускорению их осаждения.

Сгущаемые пульпы характеризуются широким диапазоном гранулометрического состава. В процессах обогащения и металлургической переработки основная доля твёрдой фазы обычно представлена тонкодисперсными частицами, что требует применения реагентной обработки для обеспечения требуемой скорости осаждения и стабильности работы сгустителя.

Таким образом, требования к процессу сгущения обычно формулируют двойственно:

- осуществить выполнение ключевого тренда развития современного производства, включающего элемент устойчивого производства, то есть обеспечить осветлённый слив требуемой чистоты для возврата в оборот и выполнения экологических и природоохранных нормативов [7];

- получить сгущённый продукт с заданной массовой долей твёрдого и такими реологическими свойствами, чтобы он устойчиво выгружался из аппарата и транспортировался без нарушений режима перекачки и остановок потока [1, 3].

В условиях роста производительности эффективность сгустителя не может оцениваться только по одному показателю, например по плотности сгущённого продукта или расходу питания. Увеличение нагрузки на аппарат без одновременного контроля мутности слива, положения границы раздела фаз, расхода флокулянта и нагрузки на привод может сопровождаться ухудшением качества оборотной воды, нестабильной разгрузкой и ростом эксплуатационных рисков. Поэтому оценка эффективности работы сгустителя должна учитывать компромисс между качеством слива, плотностью сгущённого продукта и эксплуатационной устойчивостью аппарата. Для этого на практике применяют следующие основные показатели мониторинга процесса сгущения:

- мутность и содержание взвешенных частиц в сливе;
- массовую долю твёрдого вещества в сгущённом продукте;
- расход и удельный расход реагента на тонну твёрдого вещества;
- производительность;
- устойчивость границы раздела фаз;
- параметры разгрузки (расход, стабильность плотности);

- нагрузку на привод и крутящий момент скребкового механизма.

Для хвостовых потоков (тонкодисперсных отходов обогащения, направляемых на складирование или гидротранспортирование в хвостохранилище) решающим становится реологическое состояние сгущённого продукта. При росте концентрации твёрдого и доли тонких фракций осадок ведёт себя как неньютоновская система*: появляется выраженный предел текучести, резко возрастают потери напора в трубопроводах, усложняются пусковые режимы. Поэтому переход к пастовым режимам работы, то есть к получению высококонцентрированного сгущённого продукта, обладающего выраженными пластическими свойствами и способного сохранять форму без свободного стекания, корректнее определять через достижение требуемого предела текучести и воспроизводимости этих реологических характеристик, а не через одну фиксированную массовую долю твёрдого вещества. Значения предела текучести зависят от минералогии, тонкости, содержания глинистых частиц и режима флокуляции, поэтому целевые параметры следует подтверждать испытаниями для конкретного объекта [3–5, 8].

Современные решения в области сгущения развивались от аппаратов, ориентированных преимущественно на осветление, к агрегатам, обеспечивающим одновременно высокую производительность, более глубокое уплотнение и устойчивую работу при нестационарном питании. В промышленности применяют несколько основных групп оборудования (табл. 3) [1, 9].

Классические радиальные сгустители (см. рис. 1) остаются базовым решением благодаря простоте и надёжности, однако при большом содержании мелкодисперсных частиц и высоких требованиях к качеству слива их чувствительность к гидродинамике и изменчивости питания становится ограничивающим фактором.

Высокопроизводительные сгустители ориентированы на увеличение пропускной способности за счёт развитого узла питания и распределения: снижается турбулентность, подавляются циркуляции и «короткие протоки» к сливу, которые ухудшали бы его качество, обеспечивается более стабильное формирование гранул и агрегатов.

Высокоплотные и глубококonusные (пастовые) аппараты предназначены для получения более плотного и вязкого продукта; они предъявляют повышенные требования к разгрузке, мощности привода, прочности и износостойкости рабочих органов, а также к контролю режимов сгущения и осаждения [1, 3–11].

* Неньютоновская система – это жидкость, течение которой не подчиняется закону Ньютона. В отличие от ньютоновских жидкостей, где вязкость постоянна и не зависит от градиента скорости или приложенного напряжения, у неньютоновских жидкостей вязкость изменяется в зависимости от скорости сдвига или внешних воздействий.

Таблица 2

Ключевые показатели мониторинга процесса сгущения и методы их измерения

Производительность по питанию	м ³ /ч; т/ч; т сух. тв./ч	Расходомер питания; балансовые расчёты; АСУ ТП	Соответствие аппарата заданным расходам; базовый параметр для оценки удельных нагрузок и «узких мест»
Удельная нагрузка по площади осаждения	т сух. тв./((м ² ·ч) или м ³ /((м ² ·ч)	Расчёт: расход питания и содержание твёрдого / площадь зеркала	Сопоставимость различных сгустителей и режимов; показатель «напряжённости» аппарата
Уровень пульпы и положение границы раздела фаз	м; % высоты; тренд	Датчик уровня; датчики границы раздела фаз (при наличии) или косвенно по мутности/нагрузке	Интегральные параметры устойчивости: риск ухудшения качества слива, «захлёбывания» или чрезмерного уплотнения слоя осадка
Нагрузка на привод (крутящий момент/мощность)	% от допустимого; кН·м; кВт	Сигнал привода/частотного преобразователя; система защиты и диагностики	Сопротивление осадка и приближение к перегрузке; индикатор ухудшения разгрузки и роста реологических осложнений
Расход флокулянта (и других реагентов)	г/т сух. тв.; кг/ч	Дозирующие станции; учёт расхода; лабораторный контроль приготовления	Экономичность режима; связь с качеством слива и скоростью осаждения; риск «перерасхода ради стабильности»
Энергозатраты на привод механизма	кВт; кВт·ч/т сух. тв.	Учёт энергии привода; АСУ ТП	Индикатор сопротивления осадка и эффективности механической части; важен для сравнения режимов и оценки износа
Энергозатраты на перекачивание сгущённого продукта	кВт·ч/т сух. тв.; кВт·ч/м ³	Учёт энергии насосов; давление/расход в линии	Связь с реологией и стабильностью underflow; отражает «цену» повышения плотности
Частота отклонений режима и простоев	случаев/мес.; ч/мес.	Журналы АСУ ТП/ремонт; отчёты смен	Совокупный показатель надёжности: заиливание, перегрузка, ухудшение разгрузки, просадки качества слива
Износ и обслуживание узлов (граблины, привод, питатель, желоба)	интервалы ТО; наработка; % замен	Ремонтная статистика; осмотры; вибродиагностика/температура (при наличии)	Долговечность и стоимость жизненного цикла; связь с режимами уплотнения, абразивностью и перегрузками
Эффективность водоотбора (возврат воды в оборот)	м ³ /т сух. тв.; % возврата	Водный баланс узла; расход перелива и его качество	Ключевой KPI хвостовых схем: снижение потребности в подпиточной воде и объёма воды на хвостохранилище
Управляемость процесса (время восстановления режима, вариабельность KPI)	мин; σ/коэфф. вариации; % времени в допуске	Тренды АСУ ТП: мутность, плотность, уровень, нагрузка; анализ возмущений	Чувствительность к нестационарности питания; показатель качества автоматизации и «запаса устойчивости»

Таблица 3

Сравнение основных типов промышленных сгустителей, применяемых на предприятиях горнодобывающей промышленности

Тип сгустителя	Назначение	Конструктивные особенности	Преимущества	Ограничения/риски
Классический радиальный (гравитационный)	Технологические и хвостовые пульпы; оборотная вода	Большой диаметр; цилиндрический корпус; стандартная зона питания; практически плоское днище	Простота и надежность конструкции	Чувствительность к изменению питания; риск ухудшения качества слива при неблагоприятной гидродинамике; ограниченная плотность продукта
Высокопроизводительный	Большой объем питания при ограниченной площади (чаще хвостовые потоки)	Усовершенствованный узел питания/распределения; Более острый угол днища	Повышенная производительность на единицу площади; компактность; эффективное смещение с реагентом; снижение турбулентности	Зависимость от качества приготовления и дозирования реагента; риск ухудшения осветления при изменении класса крупности твердых частиц (гранулометрического состава)
Высокоплотный	Повышенная плотность сгущенного продукта (хвосты, иногда концентраты)	Развитая зона уплотнения (наличие решеток, дополнительное выравнивание потоков ЧЕМ); усиленные механизмы разгрузки	Увеличение возврата воды; снижение объема транспортируемой жидкости, дополнительное выравнивание потоков в чане	Рост реологического сопротивления; риск неустойчивой разгрузки; рост нагрузок и износа
Пастовый (глубококонусный)	Максимальное уплотнение; пастообразные хвосты	Увеличенная высота чана; коническое днище; режимы интенсивного уплотнения Острый угол днища	Максимальный возврат оборотной воды; снижение водонасыщенности хвостов	Высокие требования к устойчивости разгрузки; риск нештатных режимов при вязком продукте; повышенные нагрузки

Отдельно применяются осветлители-сгустители для водооборота, где приоритетом является стабильная чистота слива, и ламельные аппараты для осветления при дефиците площади. Данные виды сгустителей не применяются в горно-металлургической промышленности, поэтому речь о них в данной статье не пойдет.

При выборе оборудования важно разделять технологический класс (какие показатели должны быть достигнуты) и конструктивное исполнение (каким способом это достигается) [1].

С позиции технологической машины качество работы сгустителя зависит от следующих узлов:

- узла подачи и распределения, которое формирует гидродинамику и условия смешения с реагентом. Ошибки здесь порождают циркуляции и вынос твёрдого в слив;

- узла приготовления реагентов. Реагентное хозяйство определяет воспроизводимость флокуляции;

- скребкового механизма и привода, которые задают способность аппарата работать на плотных осадках без перегрузок. Система разгрузки определяет устойчивость выдачи вязкого продукта и во многом ограничивает достижимую плотность;

- средств контроля и защиты обеспечивают наблюдаемость режима и предотвращают аварийные состояния [1, 9].

Ключевые проблемы эксплуатации сгустителей в промышленности обычно имеют комплексную природу и усиливают друг друга [1].

Во-первых, питание почти всегда нестационарно: меняются расход, массовая доля твёрдого, гранулометрия, минералогия, доля тонких и глинистых фракций. Эти изменения напрямую влияют на скорость осаждения, эффективность флокуляции и структуру осадка, вызывая колебания качества слива и плотности сгущённого продукта [1].

Во-вторых, флокуляционный режим чувствителен к качеству приготовления раствора, точности дозирования и к условиям смешения. Недостаточная флокуляция повышает мутность слива, избыточная формирует рыхлые агрегаты, ухудшающие уплотнение и разгрузку. Дополнительный риск связан с разрушением хлопьев в насосах, трубопроводах и в турбулентной зоне питания [1, 12].

В-третьих, нестабильность границы раздела фаз становится ранним признаком потери устойчивости: её подъём ведёт к выносу твёрдого и ухудшению слива, а чрезмерное опускание – к росту сопротивления осадка, увеличению крутящего момента и ухудшению разгрузки. Неблагоприятная гидродинамика (циркуляции, вихри, неравномерность распределения по радиусу) усиливает «короткие протоки» и размыв осадка [1, 2, 13].

В-четвёртых, при стремлении к более глубокому сгущению проявляются реологические осложнения: локальные зоны уплотнённого осадка, неравномерность выдачи, склонность к образованию «пробок/застоев». Это сопровождается ростом нагрузок на привод и ускоренным износом скребков, редукторов и опорных узлов,

особенно при абразивной среде сгущаемого материала [3–5].

Наконец, традиционные схемы регулирования часто оказываются недостаточными. Сгуститель – инерционная система, и изменения расхода питания, плотности или подачи реагента отражаются на качестве слива, положении границы раздела фаз и нагрузке привода не сразу, а спустя некоторое время. Поэтому управление по одному сигналу (например, только по уровню) не гарантирует ни качества слива, ни устойчивой разгрузки, ни допустимых нагрузок на механическую часть [2, 13].

Совершенствование технологии сгущения в настоящее время развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям.

Первое – выбор глубины обезвоживания пульпы. Вместо единого подхода всё чаще рассматривают спектр решений по степени отделения жидкости: от режимов, ориентированных главным образом на осветление слива и умеренное сгущение, до высокоплотного (пастового) сгущения и фильтрованному осадку с сухим складированием. Здесь история опять связана с местом расположения сгустителя в технологической цепочке оборудования (см. рис. 2):

- для потоков, направляемых на дальнейшую переработку, более глубокая степень сгущения снижает разбавление последующих операций, уменьшает объёмы перекачки и может улучшать условия фильтрации и промывки. При этом возрастают требования к устойчивости разгрузки и воспроизводимости реологических свойств;

- для хвостов, направляемых на складирование, повышение степени сгущения увеличивает возврат воды и уменьшает долю свободной жидкости, что улучшает условия транспортирования и размещения хвостов. Фильтрация обеспечивает максимальное удаление жидкости, но требует более высоких капитальных и энергетических затрат и предъявляет повышенные требования к инфраструктуре и эксплуатации [1, 3, 6, 14].

Второе – интенсификация осаждения и подавление неблагоприятной гидродинамики. Наибольший эффект обычно даёт модернизация узла питания и распределения, заключающаяся в снижении энергии входящего потока, равномерном распределении по объёму, создании условий для устойчивого формирования агрегатов частиц и предотвращении циркуляций. Одновременно важны меры, снижающие размыв уплотнённой зоны и обеспечивающие эффективное перемещение осадка к разгрузке, к которым относятся: выбор рациональной скорости вращения, совершенствование формы рабочих органов, оптимизация профиля дна и разгрузочных устройств [1, 9].

Третье – совершенствование реагентной подготовки и дозирования. Стабильность приготовления раствора флокулянта (концентрация, выдержка, перемешивание) и точность подачи часто определяют как качество осветления, так и расход реагента. Эффект дают технологически простые меры, такие как устранение колебаний концентрации раствора, выбор рациональной точки

ввода, обеспечение достаточного смешения без разрушения хлопьев. Перспективно применение адаптивного дозирования, когда установка реагента корректируется по текущему качеству слива, нагрузке и динамике границы раздела фаз [9, 12].

Четвертое – надёжность механической части и снижение износа. Для сгустителей, в особенности для хвостовых, при переходе к высоким плотностям перво-степенны прочность и износостойкость скребков, защита привода от перегрузок, корректная смазка и герметизация узлов. Важно развивать диагностирование по нагрузке, вибрации и температуре узлов, чтобы переходить от аварийного ремонта к плановому упреждающему обслуживанию [1, 15].

Пятое – развитие контроля и автоматизации. Повышение устойчивости режима требует расширения набора измерений, таких как расход и плотность питания и разгрузки, нагрузка привода, уровень и положение границы раздела фаз, мутность слива, расход реагента. Современная практика движется к комплексному управлению, где поддерживаются одновременно качество слива, заданные свойства сгущённого продукта и ограничения по механическим нагрузкам. В условиях шумных и неполных измерений применяют расчётные оценки состояния по совокупности сигналов и статистике работы [2, 13].

Для предприятий Арктической зоны перечисленные направления имеют повышенную значимость. Логистическая удалённость и ограниченность ремонтных ресурсов увеличивают стоимость простоев, а требования к экологической безопасности водных объектов усиливают роль качества осветлённого слива и устойчивости хвостового хозяйства. Для промышленных центров Арктической зоны это особенно существенно, поскольку экологическая модернизация таких территорий рассматривается в рамках федеральных и корпоративных программ снижения негативного воздействия на окружающую среду, а любые нарушения устойчивости водооборотных и хвостовых систем приобретают повышенную производственную, природоохранную и репутационную значимость. Низкие температуры могут косвенно влиять на свойства воды, работу реагентов и условия эксплуатации коммуникаций, поэтому критичны воспроизводимость реагентной подготовки, устойчивость разгрузки и надёжность механических узлов [15–16].

Перспективные практические задачи для предприятий включают: разработку комплекса критериев оперативной оценки качества слива и запасов устойчивости режима; выбор целевых параметров сгущённого продукта с учётом транспорта и хвостового хозяйства; модернизацию узлов питания и разгрузки для подавления гидродинамических причин выноса твёрдых частиц в слив; внедрение комплексного мониторинга и защит по нагрузке и признакам ухудшения разгрузки; формирование баз данных режимов и отказов для повышения точности управленческих решений [2, 17].

На основании вышеизложенного следует заключить, что сгуститель является ключевым элементом технологических схем, определяющим эффективность водооборота, качество осветлённого слива, свойства сгущённого продукта, устойчивость последующих переделов и экологическую надёжность производства. Актуальность совершенствования сгустительного оборудования определяется необходимостью одновременного решения трёх взаимосвязанных задач: увеличения производительности аппаратов при росте объёмов переработки, обеспечения стабильной чистоты осветлённого слива для водооборотных систем и получения сгущённого продукта с заданной плотностью и реологическими свойствами. В современных условиях к указанным задачам добавляется регуляторный фактор: выполнение требований комплексного экологического разрешения, производственного экологического контроля, программ повышения экологической эффективности и перехода к наилучшим доступным технологиям. Поэтому повышение эффективности сгустителей следует рассматривать как направление не только технологической, но и экологической модернизации горно-металлургического производства. Наиболее результативные решения достигаются при согласовании технологических целей с возможностями системы транспортирования, ограничениями по механическим нагрузкам, требованиями к качеству оборотной воды, системой обслуживания оборудования, комплексного мониторинга и производственного экологического контроля [2, 3].

Список источников

1. Бауман А.В., Степаненко А.И., Баранова А.А. Теоретические основы и практика проектирования процессов и аппаратов сгущения рудных пульп // Обогащение руд. 2023. № 1.
2. Leonov R.E., Sosnovskaia D.V. Thickener as an automatic control object // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 6. С. 30–38.
3. Jewell R.J., Fourie A.B. (eds.). Paste and Thickened Tailings - A Guide. 3rd ed. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015.
4. Boger D.V. Rheology and the resource industries // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64, No. 22. P. 4525–4536.
5. Sofrà F., Boger D. V. Rheology for thickened tailings and paste - history, state-of-the-art and future directions // Paste 2011: Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2011. P. 131–133.
6. Исследование сгущения и фильтрации хвостов сульфидной флотации / Рылов К.А., Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Бурдонов А.Е. // Обогащение руд. 2024. № 6. С. 47–53.
7. Лаговская Е.В., Ярославцев А.В., Разумова Н.А. Современные системы охлаждения металлургических предприятий

8. Федорова Э.Р., Пупышева Е.А., Моргунов В.В. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 77–84.
9. Соколова А.А. Комплексные решения при интенсификации процесса сгущения // Информационные системы и технологии АПК и ПГС: сборник научных статей Международной научно-технической конференции: в 2 т. Курск, 2023. С. 260–262.
10. Исследование процесса сгущения тонкодисперсных хвостов золотосодержащих руд / Дмитриева Е.Г., Газалеева Г.И., Мусаев В.В., Ключников А.М. // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 46–50.
11. Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд / Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н., Минеева Т.С. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3 (158). С. 391–401.
12. Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В. Влияние типа флокулянта на прочностные характеристики флокул в глинисто-солевых суспензиях // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2020. Т. 63. № 6. С. 30–36.
13. Сосновская Д.В. Анализ технологического комплекса сгущения как управляемого объекта // Актуальные вопросы науки и практики и перспективы их решений: сборник научных трудов по материалам X Международной научно-практической конференции. Анапа, 2023. С. 76–78.
14. Кибирев В.И. Анализ производственного опыта складирования сгущенных хвостов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 27–32.
15. Реконструкция и модернизация Талнахской обогатительной фабрики. Основные аспекты / Волянский И.В., Лихачева Т.А., Курчуков А.М., Миллер А.А. // Цветные металлы. 2020. № 6. С. 6–11.
16. Кузнецов Н.С., Набойченко С.С., Нафталя М.Н. Автоклавно-окислительное осаждение железа в виде ярозитов из раствора, получаемого при выщелачивании файнштейна на предприятии Norilsk Nickel Harjavalta Oy // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 17–29.
17. Сольский С.В., Зеленский И.Г., Мелихов В.И. Современные расчетные методики гидротранспортных систем горно-обогатительных предприятий // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2025. Т. 316. С. 63–72.

Сведения об авторах

Лаговская Елена Владимировна – доцент, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: Lagovskayaev@norvuz.ru

Фидаров Батраз Фидарович – аспирант, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: fidarovbf@edu.norvuz.ru

Глубокова Людмила Геннадьевна – доцент, кандидат экономических наук, ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского», Норильск, Россия. E-mail: GlubokovaLG@norvuz.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

PROSPECTIVE DIRECTIONS AND METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THICKENING EQUIPMENT IN MODERN MINING AND METALLURGICAL PRODUCTION CONDITIONS

Elena V. Lagovskaya – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia. E-mail: Lagovskayaev@norvuz.ru

Batraz F. Fidarov – graduate student, N.M. Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia. E-mail: fidarovbf@edu.norvuz.ru;

Lyudmila G. Glubokova – Associate Professor, Candidate of Economic Sciences, N.M. Fedorovsky Polar State University Norilsk, Russia. E-mail: GlubokovaLG@norvuz.ru

Abstract. The article generalizes typical causes of unstable thickener performance: unsteady feed, flocculation mode and mixing condition disturbances, phase boundary fluctuations, hydrodynamic circulations, rheological complications of the sediment, mechanical overloads and wear. Areas for improvement have been identified: increasing the specific productivity of equipment, transitioning to denser thickening modes, intensifying sedimentation through modernization of feed and distribution units, improving the quality of reagent preparation and dosing, strengthening and diagnostics of drives and scraper mechanisms, developing integrated control and automation based on an expanded set of measurements and data analysis. It has been shown that for enterprises in the Arctic zone, the stability of the operating

regime, reduction of operational risks, and reproducibility of the quality of clarified overflow and thickened product are critical under conditions of limited maintenance resources, high downtime costs, and the increased cost of deviations from the technological regime.

Keywords: thickening; thickener; pulp; flocculation; clarified overflow; tails; rheology; water circulation; reliability

References

1. Bauman A.V., Stepanenko A. I., Baranova A. A. Theoretical foundations and practice of designing processes and devices for thickening ore pulps // Ore enrichment. 2023. No. 1.
2. Leonov R. E., Sosnovskaia D. V. Thickener as an automatic control object // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal. 2022. No. 6. P. 30–38.
3. Jewell R. J., Fourie A. B. (eds.). Paste and Thickened Tailings - A Guide. 3rd ed. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015.
4. Boger D. V. Rheology and the resource industries // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64, No. 22. P. 4525–4536.
5. Sofrà F., Boger D. V. Rheology for thickened tailings and paste - history, state-of-the-art and future directions // Paste 2011: Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2011. P. 131–133
6. Rylov K. A., Tyutrin A. A., Nemchinova N. V., Burdonov A. E. Investigation of thickening and filtration of tailings of sulfide flotation // Ore enrichment. 2024. № 6. pp. 47-53.
7. Fedorova E. R., Pupyshcheva E. A., Morgunov V. V. Determination of precipitation parameters during thickening and washing of red sludge // Non-ferrous metals. 2023. No. 4. pp. 77-84.
8. Sokolova A. A. Integrated solutions for the intensification of the thickening process // Information systems and technologies of agroindustrial complex and GHS: collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference: in 2 volumes Kursk, 2023. pp. 260-262.
9. Dmitrieva E. G., Gazaleeva G. I., Musaev V. V., Klyushnikov A.M. Study of the thickening process of fine-dispersed tailings of gold-bearing ores // Ore enrichment. 2022. No. 1. pp. 46-50.
10. Chernigov D. A., Bogorodsky A. V., Nabiulin R. N., Mineeva T. S. Study of thickening processes for beneficiation products of gold-bearing ores // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2021. Vol. 25. No. 3 (158). P. 391–401.
11. Seredkina O. R., Rakhimova O. V., Lanovetsky S. V. Influence of flocculant type on the strength characteristics of flocs in clay-salt suspensions // Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2020. Vol. 63. No. 6. P. 30–36.
12. Sosnovskaya D. V. Analysis of the technological complex of condensation as a controlled object // Current issues of science and practice and prospects for their solutions: a collection of scientific papers based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference. Anapa, 2023. pp. 76-78.
13. Kibirev V. I. Analysis of industrial experience in the storage of thickened tailings // Ore enrichment. 2019. No. 2. pp. 27-32.
14. Volyansky I. V., Likhacheva T. A., Kurchukov A. M., Miller A. A. Reconstruction and modernization of the Talnakh Concentrator: main aspects // Non-Ferrous Metals. 2020. No. 6. P. 6–11.
15. Kuznetsov N. S., Naboichenko S. S., Naftal M. N. Autoclave-oxidative precipitation of iron in the form of jarosite from a solution obtained by leaching feinsteel at the Norilsk Nickel Harjavalta Oy enterprise // Non-ferrous metals. 2019. No. 8. pp. 17-29.
16. Solsky S. V., Zelensky I. G., Melikhov V. I. Modern calculation methods of hydrotransport systems of mining and processing enterprises // Proceedings of the B. E. Vedenev All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering. 2025. Vol. 316. pp. 63-72.

Ссылка на статью:

Лаговская Е.В., Фидаров Б.Ф., Глубокова Л.Г. Перспективные направления и методы повышения эффективности густительного оборудования в условиях современного горно-металлургического производства // Теория и технология металлургического производства. 2026. №2(57). С. 48-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)
 Lagovskaya E.V., Fidarov B.F., Glubokova L.G. Prospective directions and methods for improving the efficiency of thickening equipment in modern mining and metallurgical production conditions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2026, vol. 57, no. 2, pp. 48-56. [https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2\(57\)-48-56](https://doi.org/10.18503/2311-5378-2026-2(57)-48-56)