

Шкоп А. А.,
Цейтлин М. А.,
Шестопапов А. В.,
Райко В. Ф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФЛОКУЛЫ В ЦЕНТРИФУГЕ

Исследованы пути снижения механического воздействия на сфлокулированные агрегаты полидисперсного шлама. Определено, что путем изменения конструкции трубы питания и условий подачи шлама в центрифугу можно снизить гидромеханическое воздействие на флокулы, обеспечив их минимальную деструкцию. Установлено, что модернизация центрифуги приводит к повышению эффективности очистки сфлокулированного шлама до 99 % и уменьшает унос твердой фазы с фугатом.

Ключевые слова: модуль очистки шламов, полидисперсные шламы, деструкция флокул, прочность флокул, усовершенствование центрифуги.

1. Введение

Современные производственные процессы, в том числе и процессы обогащения углей, предусматривают сгущение и обезвоживание образующихся шламов. При этом главной целью является разделение жидкой и твердой фаз при максимально возможной чистоте жидкой фазы, которая чаще всего используется повторно, а также наиболее низкой влажности сухого вещества твердой фазы.

Для достижения этой цели при сгущении шламов и илов в отстойных сооружениях, а также при обезвоживании шлама фильтрованием или центрифугированием применяются неионогенные и ионогенные флокулянты [1–6].

Разрушение уже образованных флокул при транспортировке шлама от сгущающего оборудования к обезвоживающему в современных водно-шламовых схемах приводит к необходимости повторной флокуляции шламов перед каждым аппаратом. Одним из важных аспектов улучшения экономических показателей процесса очистки суспензий является снижение расхода дорогостоящего флокулянта, который используется для интенсификации процесса осветления воды. Поэтому перспективной задачей является установление оптимальных условий работы обезвоживающего оборудования, позволяющего получить достаточно высокую степень очистки без необходимости повторной флокуляции после транспортировки.

Для обезвоживания полидисперсных суспензий на углеобогатительных фабриках используются дисковые вакуум-фильтры, камерные и ленточные фильтр-прессы, осудительные центрифуги и другое оборудование. Диапазон значений эффективности улавливания твердой фазы для центрифуг гораздо шире, чем для фильтров. Это обусловлено возможностью более широкого регулирования параметров процесса: фактора разделения, глубины слоя суспензии в роторе, относительной скорости вращения шнека [7].

В то же время до сих пор существует множество нерешенных вопросов разделения тонкодисперсных суспензий и последующего снижения влажности шлама

в процессе обезвоживания. Важная роль сегодня отводится созданию принципиально нового типа обезвоживающего оборудования, значительно превосходящего по технико-экономическим показателям существующее, например, описанные в [8]. Успешное решение этой задачи позволит повысить технологическую эффективность обезвоживания шлама и вместе с тем улучшить технико-экономические показатели всего процесса удаления влаги из шлама и последующей переработки твердой фазы отходов.

Таким образом, усовершенствование конструкции обезвоживающего оборудования, обеспечивающего минимальную деструкцию флокул, является актуальной научно-практической задачей.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования является процесс очистки сточных вод от взвешенных веществ центробежно-флокуляционным способом разделения суспензий. При работе модуля очистки шламов БФЯИ 3400.00.00.000 (НТЦ «Экомаш», Украина) очистка от взвешенных веществ, производится методом отстаивания в тонкослойном отстойнике с последующим обезвоживанием сгущенного продукта в центрифуге [9]. Интенсификация процессов осаждения взвешенных веществ в отстойнике происходит за счет применения флокулянтов и предварительной подготовки шламовых вод по концентрации веществ.

Сгущенный продукт тонкослойного отстойника обезвоживается в осадительной центрифуге типа ОГШ–300 (Украина). Наладке технологии модуля предшествуют лабораторные исследования шламовых вод, по результатам которых настраивается режим работы аппаратов. Принципиальная схема цепи аппаратов модуля очистки представлена на рис. 1.

Работа модуля очистки шламовых вод осуществляется следующим образом:

– шламовые воды с изменяющимся содержанием взвешенных веществ поступают в первую секцию приёмно-дозировочной ёмкости, в которой она усредняется;

- агрегатообразование взвешенных веществ в процессе мостиковой флокуляции производится во флокуляторе, куда подготовленные шламовые воды подаются с определенной производительностью (~50 м³/час);
- флокулянт подается в приемно-дозировочную емкость и флокулятор, для этого используется станция приготовления и дозирования флокулянта;
- далее шламовые воды самотёком попадают в тонкослойный отстойник, в котором они разделяются на сгущенный и осветлённый продукты;
- осветлённый продукт используется в производстве;
- сгущенный продукт отстойника обезвоживается в осадительной центрифуге; кек центрифуги используется в дальнейшем для агломерации; фугат центрифуги направляется в приемно-дозировочную емкость, либо в предосветленную воду.

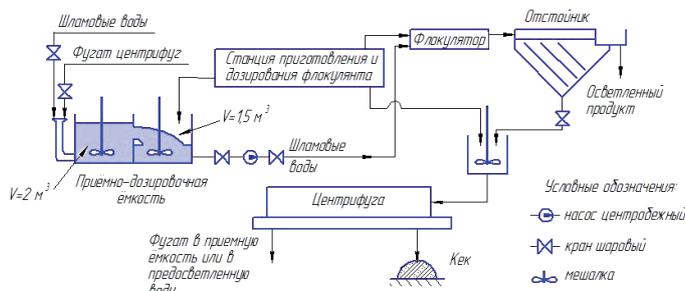


Рис. 1. Принципиальная схема цепи аппаратов модуля очистки шламов

Одним из наиболее проблемных мест в данном процессе является необходимость дофлокуляции шлама непосредственно перед центрифугой. Это связано с тем, что происходит разрушение сфлокулированных структур и мелкодисперсная фаза не полностью оседает в центрифуге, выносится из нее и загрязняет фугат. Причиной этого является механические воздействия на флокулы при транспортировании сгущенного шлама и его обезвоживания в центрифуге. Дополнительная флокуляция перед центрифугой приводит к увеличению расхода дорогостоящих флокулянтов. С другой стороны, перефлокуляция шлама приводит к увеличению его вязкости, что затрудняет работу центрифуги.

Отсутствие экспериментальных данных разрушения флокул полидисперсных шламowych суспензий, позволяющих описать модель процесса и выбрать направление усовершенствования технологической схемы и аппарата обезвоживания, определяет актуальность данного исследования. Для выявления особенностей данного процесса с точки зрения минимизации деструкции флокул в центрифуге проводился технологический аудит, имеющий целью определение способов снижения механического воздействия на флокулы, уменьшения возникающих сдвиговых напряжений и соответственно повышение эффективности очистки шлама. Исследование проводилось на базе НТЦ «Экомаш» (Украина) с использованием реального шлама одной из углеобогатительных фабрик и оборудования модуля очистки шламowych вод (рис. 1).

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – совершенствование технологической схемы очистки и обезвоживания полидисперсных шламов на основе оптимизации процесса обезвоживания шлама в центрифуге путем снижения механического

воздействия на флокулы, приводящего к их разрушению. Это позволило бы повысить качество очистки шлама от мелкодисперсных частиц и отказаться от стадии дофлокуляции перед центрифугой, а, следовательно, и сократить расход дорогостоящего флокулянта.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Предложить способы модернизации конструкции центрифуги, при которой повышается эффективность очистки шлама вследствие снижения механического воздействия на флокулы.
2. Сравнить эффективность работы стандартной и модернизированной центрифуги.

4. Исследование существующих решений проблемы

Сегодня еще недостаточно изучены изменения флокул после механического воздействия, их прочностные характеристики и механизм сохранения прочности. Согласно теоретическим представлениям, механизм разрушения флокул обусловлен гидродинамическими факторами, действие которых вызывает деформацию, а затем и разрушение сформировавшихся флокул [10]. Процесс разрушения начинается, когда напряжения, действующие на флокулу, достигают предела ее прочности. Деструкция флокул происходит в результате разрыва полимерных мостиков при напряжении сдвига [11]. Исследовано, что прочность агрегатов возрастает с увеличением дозы флокулянта [12]. Поэтому на практике применяют флокулянты в избытке, используя дофлокуляцию.

Из литературных источников известно, что суспензии без применения флокулянтов по характеру течения близки к ньютоновским жидкостям [13], а при подаче флокулянта суспензия приобретает псевдопластичные свойства [14, 15]. Общие рекомендации по уменьшению разрушения флокул сводятся к снижению деформации сдвига [16]. Так, например, для предотвращения процессов разрушения флокул авторы [17] предлагают уменьшать частоту вращения ротора центрифуги с учетом ослабления действия центробежных сил. Но для применения центрифуг необходимо иметь гибкую схему управления скоростями ротора и шнека для задания таких режимов работы агрегата, при которых становится возможным снизить фактор разделения центрифуги в 2–4 раза, чтобы и избежать разрушения флокул в слишком напряженном силовом поле. В современном обезвоживающем оборудовании невозможно избавиться от механических воздействий, поэтому в центрифугах происходят процессы образования и разрушения флокул при движении внутрироторных потоков. В то же время эффективное разделение происходит только при сохранении размера флокул, обеспечивающего осаждение в центрифуге. Кроме режимов движения самого потока, существенное влияние оказывают процессы истечения шлама из трубы питания, разбрызгивания в барабане шнека и столкновение с движущимся потоком на поверхности ванны ротора. Эти процессы настолько сложны, что количественно их оценить достаточно сложно, поэтому они требуют экспериментальной проверки.

Результаты исследований, описанные в [18], показали, что остаточная скорость оседания флокул после механического воздействия, которая характеризует размер и структуру агрегатов, изменяется в зависимости

от условий флокуляции. Было показано, что скорость осаждения флоккул при одинаковом расходе флокулянта возрастает при концентрации твердой фазы ниже 30 г/дм^3 с максимальной скоростью при 10 г/л . Также отмечено, что с ростом содержания твердой фракции крупностью более 40 мкм повышается прочность флоккул к механическим воздействиям. Также в [18] было установлено, что критерием эффективности процесса образования прочных агрегатов может служить остаточная скорость оседания флоккул после механического воздействия. Результаты промышленных испытаний по центрифугированию шламов показали, что достаточно высокая эффективность удаления твердой фазы достигается при значениях остаточной скорости оседания флоккул равной 2 мм/с . При уменьшении остаточной скорости ниже 2 мм/с падает существенно эффективность обезвоживания шлама, а при увеличении эффективность возрастает незначительно.

На основании этих исследований возможно управлять процессом и формировать достаточно прочные флоккулы с минимальным расходом флокулянта при корректировке шлама по концентрации (путем разбавления) и гранулометрическому составу (путем внесения дополнительной фракции твердой фазы соответствующей крупности). Но в реальных условиях не всегда имеется возможность корректировки шлама из-за отсутствия источника грубодисперсной твердой фракции или дополнительной жидкой фазы. Поэтому, вторым путем улучшения схемы работы модуля очистки шламов (рис. 1) может быть изменение конструктивных особенностей центрифуги для снижения механического воздействия на флоккулы. Этому вопросу и посвящены дальнейшие исследования.

5. Методы исследований

Исследование механического воздействия на флоккулы проводили по упрощенной схеме работы модуля очистки, представленной на рис. 2. На схеме указаны размеры участков трубопровода питания центрифуги, на которых имеются различные условия течения пульпы.

Флокуляцию проводили на шламе одного из производств при различном содержании твердого вещества в пробе $60\text{--}150 \text{ г/л}$. Предварительно в лабораторной химической посуде подобрали флокулянт и его концентрацию таким образом, чтобы остаточная скорость оседания флоккул по методике, описанной в [18] составила 2 мм/с . При меньших значениях остаточной скорости существенно падает эффективность очистки и наблюдается загрязнение фугата мелкодисперсной фазой шлама. Это свидетельствует о том, что флоккулы меньшей гидравлической крупности не успевают осесть в центрифуге, разрушаются и высвобождают мелкую фракцию, частично уносимую фугатом.

Через 15 секунд после дозирования флокулянта полученные флоккулы начали оседать в мешалке, через 30 секунд после дозирования флокулянта было открыто питание из промышленной мешалки в центрифугу. Перед

центрифугой (рис. 1) был установлен пробоотборник, позволяющий отбирать пробы шлама и исследовать остаточную скорость перед центрифугой путем осаждения флоккул в мерном цилиндре. В процессе промышленного эксперимента состояние фугата центрифуги контролировалось постоянно.

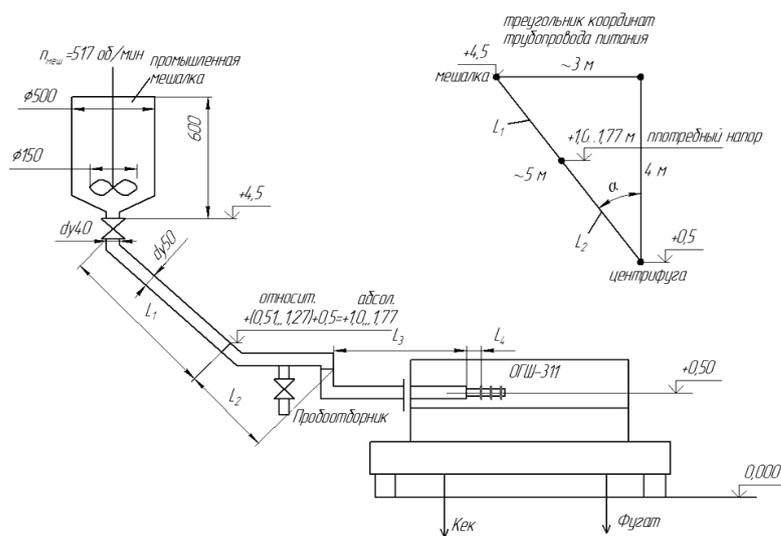


Рис. 2. Схема цепи аппаратов промышленного эксперимента

Эффективность очистки шлама по твердой фазе определяли по формуле, %:

$$E = \frac{100 \cdot (C_1 - C_2)}{C_1}, \quad (1)$$

где C_1, C_2 – содержание твердой фазы во входящем шламе и фугате центрифуги соответственно, кг/м^3 .

Исследование механического воздействия на флоккулы проводили на центрифуге ОГС-461 (Украина), а также на центрифуге ОГС-311 (Украина), которую в ходе эксперимента модернизировали путем изменения конструктивных особенностей. Во-первых, была изменена конструкция трубы питания (рис. 3). Такое решение позволяет пульпе стекать по касательной к поверхности барабана в направлении его движения. В течение экспериментов при различной частоте вращения ротора в трубе питания было открыто первое сечение жиклеров (рис. 3).

Первое сечение жиклеров трубы имеет три патрубка $\varnothing 12 \text{ мм}$ (длина $l \approx 15 \text{ мм}$).

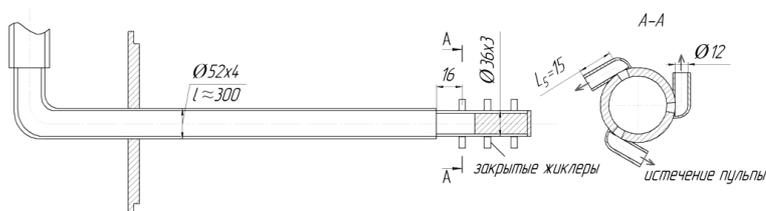


Рис. 3. Эскиз трубы питания центрифуги

Во-вторых, барабан шнека модернизированной центрифуги ОГС-311 был оборудован разгонной втулкой с направляющими трубками (рис. 4), обеспечивающими подачу пульпы вначале в канавки разгонной втулки, а затем на поверхность ванны ротора.

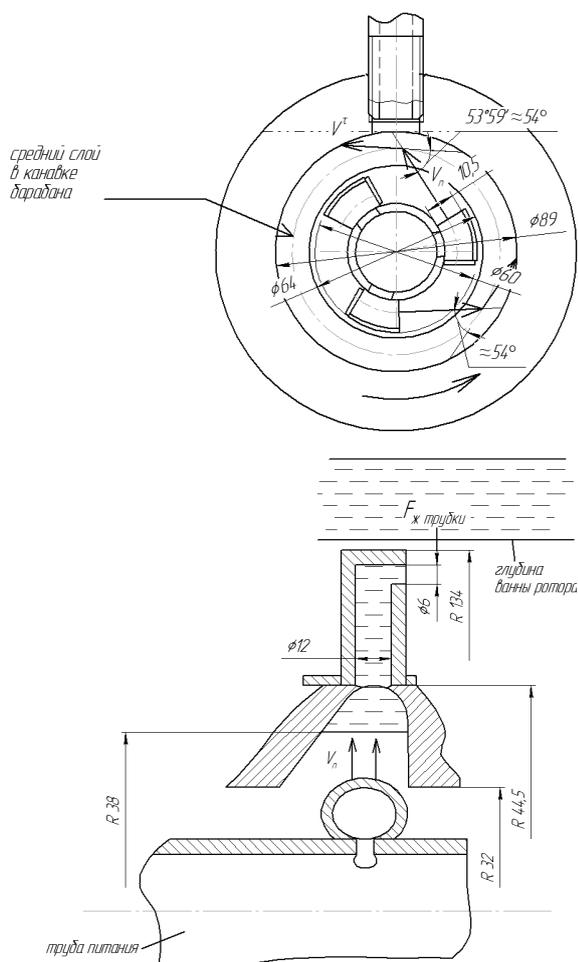


Рис. 4. Движение пульпы из жиклеров трубы питания разгонного барабана шнека и далее по направляющей трубке

Такое решение должно препятствовать разбрызгиванию суспензии и направлять сфлуккулированную пульпу сразу на поверхность глубины ванны ротора, тем самым уменьшая сдвиговые напряжения и разрушение флоккул.

6. Результаты исследования

В результате экспериментальных исследований с применением центрифугальной установки ОГШ-461 (без усовершенствований) и ОГШ-311 (с разгонной втулкой) при различной частоте вращения ротора было выявлено, что указанные выше конструкционные изменения влияют на эффективность работы центрифуг (табл. 1).

Анализ данных табл. 1 показывает, что затраты тока электропривода ротора в центрифуге ОГШ-311 усовершенствованной конструкции существенно ниже, чем в центрифуге ОГШ-461 при том же факторе разделения (например, при $Fr \approx 1000$ и $Fr \approx 1500$). Это свидетельствует о снижении затрачиваемой полезной работы в центрифуге ОГШ-311 на преодоление гидравлического сопротивления. В результате этого снижается и механическое воздействие на сфлуккулированные агрегаты. Последнее предположение подтверждает сравнительный анализ эффективности очистки шлама, который в центрифугальной установке усовершенствованной конструкции достигает 98–99 % по твердой фазе.

Таблица 1

Сравнительная характеристика испытаний центрифугальных установок

Наименование параметра	Центрифугальная установка ОГШ-461 (без изменения конструкции)			Центрифугальная установка ОГШ-311 (с разгонной втулкой)		
	1600	1900	2400	2500	3000	3500
Частота оборотов ротора, об/мин	1600	1900	2400	2500	3000	3500
Фактор разделения (Fr)	654	923	1470	1080	1550	2110
Величина тока холостого хода элетропривода ротора, А	29,7	32,5	34	10,4	11,5	12,6
Затраты тока электропривода ротора на 1 м ³ воды, А/м ³	1,3	1,34	1,6	0,5	0,7	1,2
Затраты тока электропривода ротора на 1 м ³ пульпы (при концентрации твердой фазы 100–150 г/л) без обработки флокулянтном, А/м ³	1,38	1,42	1,83	1,1	1,4	1,8
Эффективность задержания твердого пульпы без обработки флокулянтном, %	60	58	86	80	90	85
Затраты тока электропривода ротора на 1 м ³ пульпы (при концентрации твердой фазы 70–100 г/л) обработанной флокулянтном, А/м ³	1,3	1,4	1,5	0,98	1,39	2,5
Эффективность задержания твердой фазы пульпы, обработанной флокулянтном при остаточной скорости оседания агрегатов 2 мм/сек, %	26	47	91,6	99	98	80

В то же время следует заметить, что эффективность центрифуги без изменения конструкции трубы питания и разгонной втулки (даже при остаточной скорости осадения флоккул 2 мм/с) не сильно отличается от ее эффективности без флокулянта. Это свидетельствует о том, что образованные флоккулы практически полностью разрушаются в центрифуге стандартной конструкции за счет механического воздействия, превышающего их прочность.

На втором этапе исследований были проанализированы режимные параметры движения жидкости в центрифуге модернизированной конструкции ОГШ-311. Для расчета прироста скорости при встрече струй из жиклеров трубы питания и слоев пульпы, находящихся на внутренней поверхности барабана шнека используем тангенциальную скорость на внутренней поверхности барабана шнека и проекцию скорости истечения из жиклера, а именно:

$$|V_{\text{вст}} \cdot \sin 36^\circ - V_{\text{т.бар}}| = \Delta V \text{ м/с.} \quad (2)$$

Для исключения повреждения флоккул необходимо минимизировать ΔV .

Из жиклеров трубы питания пульпа напорной струей попадает в канавку разгонного барабана шнека (рис. 4), которая заполнена частично пульпой. Угол встречи струи определен из графического анализа фактической конструкции, который составляет $\approx 54^\circ$.

Скорость истечения пульпы из жиклера трубы питания при различных напорах определяется формулой:

$$V_{\text{н}} = \varphi \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3)$$

где φ – коэффициент скорости = 0,815.

Значение скоростей истечения из жиклера трубы питания, определенные при напорах 0,51, 1,27 и 2,94 м составят соответственно 2,58, 4,1 и 6,2 м/с.

Окружные скорости на среднем радиусе канавки в разгонном барабане шнека при различных оборотах ротора (1500–3000 об/мин.) приведены в табл. 2.

$$V_{\text{окр}} = \omega \cdot R_{\text{ср}}, \tag{4}$$

где ω – угловая скорость барабана шнека, рад/с; $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, где n – частота вращения шнека, об/мин; $R_{\text{ср}} = 38 \text{ мм} = 0,038 \text{ м}$, $\sin 36^\circ = 0,588$.

Таблица 2

Значение скорости на среднем радиусе канавки в разгонном барабане шнека

ω , рад/с	n , об/мин	$V_{\text{окр}} = \omega \cdot R_{\text{ср}}$, м/с	$ V_n \cdot \sin 36^\circ - V_{\text{окр}} $, м/с			$F_T = \frac{0,31 \cdot n^2}{1800}$
			При расходе Q_n , м ³ /час			
			3	5	7,3	
150	1500	5,7	4,2	3,3	2,1	388
200	2000	7,6	6,1	5,2	4,0	689
250	2500	9,5	8,0	7,1	5,9	1076
300	3000	11,4	9,9	9,0	7,8	1550

В ходе экспериментальных исследований центрифугирования сфлокулированного шлама минимальные значения содержания твердого вещества в фугате были получены при напорах 0,51 м и 1,27 м, то есть приращение скорости движения пульпы в месте контакта струи с поверхностью пульпы в разгонном барабане шнека до 8 м/с (табл. 2, выделено жирным).

Характер распределения расходов и характер течения пульпы при встрече струи с поверхностью пульпы в разгонном барабане показан на рис. 5.

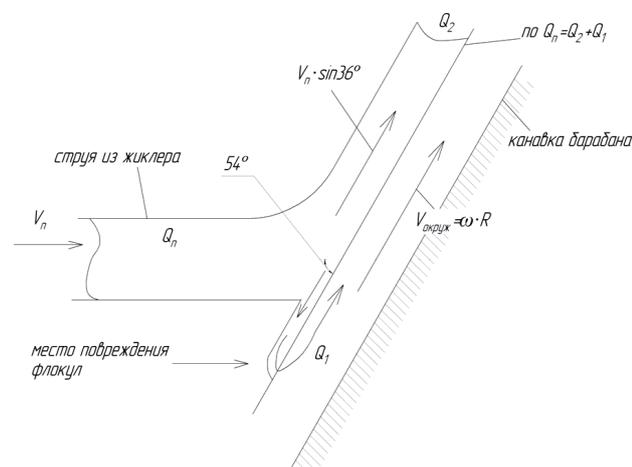


Рис. 5. Качественная схема встречи струй пульпы из жиклеров трубы питания с пульпой в канавке разгонного барабана шнека

Согласно рис. 5, при встрече струй пульпы из жиклеров трубы питания с пульпой в канавке разгонного барабана шнека под углом, меньшая часть потока пульпы Q_1 испытывает сдвиговый градиент скорости порядка 11–12 м/с.

В отсутствие таких закручивающих поток каналов, в центрифугах стандартной конструкции поток пульпы из жиклеров встречается с поверхностью барабана шнека практически под прямым углом. В результате этого большая часть потока подвергается повышенному механическому воздействию. Поэтому, желательно в пульпе, обработанной флокулянтном, иметь переизбыток флокулянта для восстановления поврежденных флокул.

Таким образом, возможно конструкторско-технологическое обеспечение прочности флокул пульпы (снижение гидромеханического воздействия на сфлокулированные агрегаты) в процессе обезвоживания в поле центробежных сил.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. В результате проведенного эксперимента было установлено, что возможным путем снижения гидромеханического воздействия на флокулы может быть конструкторско-технологическое изменение условий течения сфлокулированной пульпы от сгустителя, а также условий подачи суспензии в центрифугу. Модернизация конструкции центрифуги позволяет снизить механическое воздействие на образованные флокулы и сохранить их размер, что повышает эффективность очистки суспензии до 99 %. Кроме того, снижение затрат тока электропривода ротора на очистку шлама приводит к существенной экономии электроэнергии при работе центрифуги.

Weaknesses. Для определения возможности оптимизации оборудования необходимо проводить соответствующие физико-химические исследования свойства шламов и качества их очистки. Такие показатели как концентрация и гранулометрический состав, влияют на вязкость суспензии, а, следовательно, и на гидромеханические процессы внутри центрифуги. Оптимизации лишь процесса флокуляции или только конструкции центрифуги не решают проблему снижения расхода флокулянта на стадии дофлокуляции шлама.

Opportunities. Следующим этапом исследований станет разработка усовершенствованной схемы очистки шламов с учетом возможности корректировки шлама по концентрации и гранулометрическому составу, влияющих на свойства сфлокулированной суспензии и прочность агрегатов. Это даст возможность регулировать степень очистки шлама за счет как интенсификации процесса образования прочных агрегатов на стадии флокуляции, так и минимизировать деструкцию сфлокулированных агрегатов на стадии обезвоживания. Такое решение позволит отказаться от стадии дофлокуляции шлама и снизить эксплуатационные затраты процесса очистки за счет экономии дорогостоящего флокулянта.

Threats. Изменение конструкции оборудования предусматривает дополнительные материальные затраты, связанные с необходимостью проведения опытно-конструкторских работам и отсутствием серийно выпускаемых деталей. Эти же причины могут препятствовать выходу модернизированного оборудования на рынок.

8. Выводы

1. Установлены пути минимизации механических воздействий в центрифуге. Одним из путей является

изменение конструкционных особенностей центрифуги. Предложены способы модернизации конструкции центрифуги, при которой повышается эффективность очистки шлама вследствие снижения механического воздействия на флокулы и как следствие повышается эффективность очистки шлама. Для этого вдоль боковой поверхности трубы питания выполнены каналы, направленные тангенциально к боковой поверхности трубы питания таким образом, чтобы направление течения суспензии из каналов совпадало с направлением вращения ротора. Такое решение позволяет пульпе стекать по касательной к поверхности барабана. В результате такой подачи только малая часть потока испытывает сдвиговые напряжения. Второй конструкционной особенностью, снижающей механические воздействия на флокулы, является установка в барабане разгонной втулки с направляющими трубками, препятствующими разбрызгиванию суспензии. Движение пульпы из жиклеров трубы питания в канавку разгонного барабана шнека и далее по направляющей трубке осуществляется более плавно, чем в их отсутствии. В результате жидкость плавно стекает сразу на поверхность глубины ванны ротора, после чего начинается осаждение в поле центробежных сил агрегатов сфлукулированного шлама.

2. Сравнительный анализ работы стандартной и модернизированной центрифуги показал существенное повышение эффективности очистки сфлукулированного шлама, которая достигает 99 % при остаточной скорости осаждения шлама 2 мм/с и более. Кроме того, центрифуга измененной конструкции в результате уменьшения гидравлического сопротивления имеет меньшие затраты тока электропривода ротора на очистку 1 м³ пульпы.

Литература

- Ofori, P. Shear-induced floc structure changes for enhanced dewatering of coal preparation plant tailings [Text] / P. Ofori, A. V. Nguyen, B. Firth, C. McNally, O. Ozdemir // *Chemical Engineering Journal*. – 2011. – Vol. 172, № 2-3. – P. 914–923. doi:10.1016/j.ccej.2011.06.082
- Kumar, S. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings [Text] / S. Kumar, S. Bhattacharya, N. R. Mandre // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2014. – Vol. 114, № 11. – P. 945–949.
- Kumar, S. Flocculation studies of coal tailings and the development of a settling index [Text] / S. Kumar, N. R. Mandre, S. Bhattacharya // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2015. – Vol. 36, № 6. – P. 293–305. doi:10.1080/19392699.2015.1062001
- Parekh, B. K. Dewatering of fine coal and refuse slurries problems and possibilities [Text] / B. K. Parekh // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 621–626. doi:10.1016/j.proeps.2009.09.098
- Ji, Y. Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculent [Text] / Y. Ji, Q. Lu, Q. Liu, H. Zeng // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2013. – Vol. 430. – P. 29–38. doi:10.1016/j.colsurfa.2013.04.006
- Wang, W.-D. Experimental study on slime water flocculation sediment based on the montmorillonite hydration expansion inhibition [Text] / W.-D. Wang, H.-F. Wang, J.-T. Sun, Y. Sun // *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. – 2013. – Vol. 19, № 4. – P. 530–534. doi:10.1007/s12404-013-0414-y
- Шкоп, А. А. Обезвоживание угольных полидисперсных суспензий [Текст] / А. А. Шкоп // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 2/6 (74). – С. 44–49. doi:10.15587/1729-4061.2015.40557
- Полулях, А. Д. Технико-экологический анализ технологических решений по обработке жидких отходов ЦОФ «Павлоградская» [Текст] / А. Д. Полулях, Д. А. Полулях // *Збагачення корисних копалин*. – 2013. – Вип. 52 (93). – С. 145–154.
- Трошин, Г. П. Технология очистки и обезвоживания высокодисперсных илов углеобогатительной фабрики [Текст] / Г. П. Трошин, А. А. Шкоп, С. А. Савельев, Н. Г. Пономарева // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2015. – № 2. – С. 74–78.
- Борц, М. А. Обезвоживание хвостов флотации углеобогатительных фабрик [Текст] / М. А. Борц, Ю. П. Гупало. – М.: Недра, 1972. – 302 с.
- Vigdergauz, V. E. Mechanical destruction of floccules by shearing [Text] / V. E. Vigdergauz, G. Yu. Gol'berg // *Journal of Mining Science*. – 2013. – Vol. 49, № 2. – P. 284–289. doi:10.1134/s1062739149020111
- Гольберг, Г. Ю. Образование, существование и разрушение флокуляционных структур [Текст] / Г. Ю. Гольберг, А. А. Лавриненко // *Горный информационный бюллетень*. – 2015. – № 11. – С. 47–54.
- Коновалова, Т. А. Применение флокулянтов для повышения экологической безопасности водно-шламовых схем углеобогатительных фабрик [Текст] / Т. А. Коновалова, Г. Б. Векслер, А. А. Лавриненко, Г. Ю. Гольберг // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2014. – № 1 (19), Т. 3. – С. 5–10.
- Il'in, S. O. Rheological properties of high-concentration suspensions used for obtaining electrorheological media [Text] / S. O. Il'in, A. Ya. Malkin, E. V. Korobko, Z. A. Novikova, N. A. Zhuravskii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2011. – Vol. 84, № 5. – P. 1016–1025. doi:10.1007/s10891-011-0562-0
- Heller, H. Anionic Polyacrylamide Polymers Effect on Rheological Behavior of Sodium-Montmorillonite Suspensions [Text] / H. Heller, R. Keren // *Soil Science Society of America Journal*. – 2002. – Vol. 66, № 1. – P. 19–25. doi:10.2136/sssaj2002.0019
- Evmenova, G. L. Influence of deformation of a medium on flocculation of coal dispersions [Text] / G. L. Evmenova // *Journal of Mining Science*. – 2008. – Vol. 44, № 3. – P. 298–301. doi:10.1007/s10913-008-0020-3
- Колодников, И. А. Очистка растворов урансодержащих соединений от механических примесей методом центрифугирования [Текст] / И. А. Колодников, С. Н. Кладиев, С. И. Кривокустов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – № 2. – С. 50–54.
- Shkop, A. Exploring the ways to intensify the dewatering process of polydisperse suspensions [Text] / A. Shkop, M. Tseitlin, O. Shestopalov // *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. – 2016. – № 6/10 (84). – P. 35–40. doi:10.15587/1729-4061.2016.86085

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ НА ФЛОКУЛИ В ЦЕНТРИФУЗІ

Досліджено шляхи зниження механічної дії на сфлукульовані агрегати полідисперсного шламу. Визначено, що шляхом зміни конструкції труби живлення і умов подачі шламу в центрифугу можна знизити гідромеханічний вплив на флокули, забезпечивши їх мінімальну деструкцію. Встановлено, що модернізація центрифуги призводить до підвищення ефективності

очищення сфлокульованого шламу до 99 % і зменшує винесення твердої фази з фугатом.

Ключові слова: модуль очищення шламів, полідисперсні шлами, деструкція флокул, міцність флокул, швидкість осідання, удосконалення центрифуги.

Шкоп Андрей Александрович, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: shkop_ecomass@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1974-0290>

Цейтлин Моисей Абрамович, доктор технических наук, профессор, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политех-

нический институт», Украина, e-mail: mzeit@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2452-7814>

Шестопалов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: shestopalov.it@khp.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6268-8638>

Райко Валентина Федоровна, кандидат технических наук, профессор, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: raiko.ntu@yandex.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5527-1874>

UDC 57.088.55; 663.127

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.93766

Karpenko Yu.

STUDY OF MODIFICATION OF MAGNETICALLY LABELED YEASTS *Saccharomyces cerevisiae* FOR COPPER CATIONS Cu^{2+} REMOVAL

Досліджено сорбційну ємність магнітомічених дріжджів *S. cerevisiae*, отриманих за допомогою багатовихрового магнітогідродинамічного перемішування суспензії з нанорозмірним магнетитом Fe_3O_4 , в залежності від модифікації клітинної стінки. Також досліджено метилювання аміногруп, етерифікацію карбоксильних груп, обробку лугом і екстракцію ліпідів магнітомічених дріжджів *S. cerevisiae*. Отриманні результати показали вклад компонентів клітинної стінки в максимальну сорбційну ємність біосорбенту по відношенню до катіонів міді Cu^{2+} .

Ключові слова: магнітомічені дріжджі *S. cerevisiae*, сорбційна ємність біосорбенту, функціональні групи.

1. Introduction

The development and perfection of methods of waste water treatment from different origin pollutants, including heavy metals cations such as a copper, iron, etc, remain relevant today. The yeasts *S. cerevisiae* are not the most effective biosorbent of heavy metals, but their availability largely overlaps competitors. Besides this type of yeasts it is well studied that simplifies the search of ways of modification or activation of biomass for a biosorption.

Sorption capacity towards copper cations Cu^{2+} of magnetically labeled biosorbent based on the yeast *S. cerevisiae*, obtained by multi-vortical magnetohydrodynamic (MHD) stirring depends on the number of attached nanosized magnetite Fe_3O_4 [1]. A passive biosorption by magnetically labeled yeasts takes place apparently due to the stoichiometric ratios of functional groups of the cellular wall components to the metal ions and physical adsorption by electrical interactions [2], and also due to a sorption by magnetite. The magnetite has significant electrokinetic potential [3] and is able to absorb copper cations. Carboxyl and amino groups presented in mannan-protein layer and lipoproteins can be regarded as major groups involved in passive biosorption. There is a necessity to reduce, what amount of functional groups and also components of cellular wall has been blocked by magnetite during multi-vortical MHD stirring.

2. The object of research and its technological audit

The object of research is magnetically labeled biosorbent. Magnetically labeled biosorbent is a suspension of cells modified by attaching magnetic labels to the cellular wall using multi-vortical MHD stirring. The technological characteristics of magnetically labeled yeast are the following:

- mass ratio of magnetic labels towards yeasts – 1 %;
- sorption capacity towards copper cations Cu^{2+} – 25 mg/g dry mass of sorbent;
- magnetic susceptibility – $5,5 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-3}$;
- biosorption optimal pH – 5,0–5,5;
- duration of storage – 2 days.

Manufacturing process settings of magnetically labeled yeast (multi-vortical MHD stirring):

- strength of the external magnetic field – 240–280 kA/m;
- working environment pH – 2,5–3;
- process duration (cycle) – 2 min.

One of the main drawbacks of magnetically labeled biosorbent based on yeast *S. cerevisiae* is low sorption capacity comparing to other biosorbents, such as brown algae. To increase the sorption capacity of yeast it is necessary to clarify the contribution of cellular wall components in passive sorption of copper cations. Therefore, the main focus of the study is to identify the contribution