

УДК 628.336.43

ОСОБЕННОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОСАЖДЕНИЯ ОРГАНОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

*И.А. ЕЛЬШИНА, канд. техн. наук, доц. А.И. ЕЛЬШИН, д-р техн. наук, проф. Г.Н. АБАЕВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены теоретические основы центробежного осаждения сжимаемых осадков. Предложена база для построения кинетической модели процесса центрифугирования органосодержащих отходов и активного ила очистных сооружений в частности.

Существует достаточное число моделей и теорий обезвоживания сжимаемых осадков [1 - 7]. Однако большинство из них применимы лишь для конкретных типов суспензий и веществ и при определенных условиях ведения процесса. Механизм обезвоживания органосодержащих осадков и отходов сложен и определяется большим числом факторов: структурой агрегатов из первичных частиц, плотностью упаковки частиц, наличием адсорбционных слоёв жидкости (связанной влаги) в зонах контакта частиц [1, 2].

Рассмотрим более подробно процесс центробежного осаждения активного ила очистных сооружений.

Основы для моделирования

Седиментация. В процессе седиментации полидисперсной суспензии можно выделить следующие зоны: зону свободного осаждения частиц суспензии; зону стесненного осаждения и структурированный осадок. Если представить скорость осаждения как функцию продолжительности процесса, то уравнение кривой уплотнения несжимаемого осадка $h = f(t)$ может быть записана в форме [1]:

$$dh_{oc} / dt = k_c (h_{oc} - h_{poc}), \quad (1)$$

где h_{oc} – высота уплотненной зоны за время t ; h_{poc} – равновесная высота уплотненной зоны при $t \rightarrow \infty$; k_c – постоянная для данной суспензии; $h_{oc} - h_{poc}$ – мера отклонения реальной системы от равновесия.

В зоне стесненного осаждения предполагается, что скорость движения частиц относительно жидкой фазы является только функцией концентрации (объемной доли ϕ) твердой фазы. В этой зоне скорость движения частиц u_{st} меньше скорости свободного осаждения u_{og} . Под воздействием массы оседающих частиц поток вытесняемой жидкости, движущийся в направлении противоположном движению частиц, становится значительным. Скорость u_{st} может быть выражена через скорость свободного осаждения и поправочную функцию, связанную с объемной долей твердой фазы ϕ : $f(1-\phi) = f(\varepsilon)$, т.е.

$$u_{st} = u_{og} f(\varepsilon), \quad (2)$$

где ε – объемная доля свободной жидкой фазы в дисперсии; u_{og} – скорость свободного осаждения; u_{st} – скорость стесненного осаждения, а поправочная функция на стесненное осаждение может быть представлена, например, эмпирическим уравнением типа [1]:

$$f(\varepsilon) = \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)}. \quad (2')$$

Состояние моделирования седиментации идеальной и флокулированных суспензий с уплотнением осадка можно проследить, например, в серии работ [4 - 7].

Центробежное осаждение частиц. Процесс центробежного осаждения часто моделируется на основе модели гравитационного осаждения частиц с использованием масштабного коэффициента – фактора разделения $K_p = \omega^2 r / g$, таким образом, скорость центробежного осаждения равна $u_{og} K_p$.

Соколов [2] дает обобщенное уравнение скорости центробежного осаждения по форме схожее с уравнением гравитационного осаждения (2):

$$u_{st} = 2CK_p f(\varepsilon) / (\mu \cdot S^2),$$

где для центрифуг со сплошным ротором $C = g(\rho_s - \rho_l)$; S – удельная поверхность частиц; ρ_s – плотность твердой фазы; ρ_l – плотность жидкой фазы.

Для одинаковых сферических частиц $S = 6/d$ имеем

$$u_{st} = CK_p f(\varepsilon) \cdot d^2 / (18\mu), \quad (3)$$

где d – диаметр частиц; μ – вязкость среды.

Применение формул типа (3) для моделирования зависимости объема осветленной жидкости от времени t связано с трудностью определения истинной величины ε , а также необходимостью знания зависимости ε от толщины осадка или от времени. Обе зависимости представляют собой многопараметрическую систему.

Осадок. Представленная на рис. 1 схема центробежного осаждения, позволяет наглядно разоб-
ратся в происходящих в суспензии и осадке процессах. В начальный период времени из общего объема

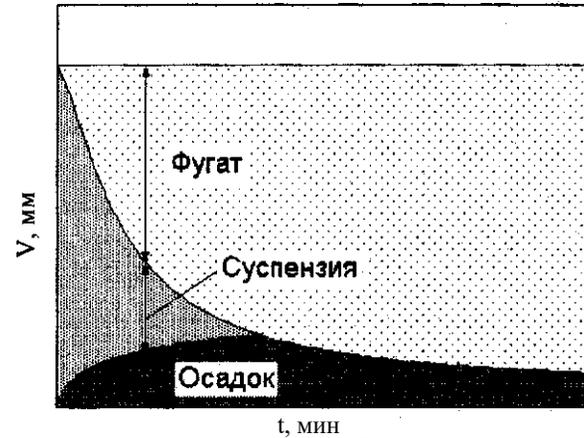


Рис. 1. Зависимость объема фугата от времени центрифугирования и схема распределения фугата, суспензии и осадка

осадок считается несжимаемым. В этой связи максимум объемной доли твердого вещества в осадке не зависит от сжимающих напряжений, действующих в осадке, а определяется только условием максимальной упаковки частиц в осадке.

При седиментации флокулированной суспензии осадок представляет собой сжимаемую структуру, для уплотнения которой до равновесного состояния требуется время, зависящее от структурных характеристик осадка и его проницаемости. В этом случае феноменологическая теория процессов седиментации - уплотнения описывает процесс осаждения флокулированной суспензии, основываясь на двух определяющих функциях: функции Кинча для плотности потока при периодическом осаждении и эффективных напряжениях в твердой фазе. Эти функции зависят только от локальной концентрации твердой фазы [4]. При центрифугировании используют масштабный коэффициент K_p .

Сжимающее давление на единицу площади слоя осадка называется эффективным давлением p_e [5]. Силы трения, тяжести и центробежная сила являются основными компонентами p_e . Напряжения в скелете осадка σ_e и эффективное давление p_e зависят от относительной скорости движения твердой и жидкой фаз. Полуэмпирическое уравнение $\sigma_e(\phi)$ включает критическую концентрацию ϕ_k , соответствующую верхней, минимально нагруженной границе осадка. В общем случае при $\phi \geq \phi_k$ $\sigma_e(\phi) = k[(\phi/\phi_k)^n - 1]$, где $k > 1$, $n \geq 1$. Сжимающее напряжение σ_e может быть также представлено в форме экспоненциальной функции [3, 6]. Для нахождения подходящих функций $f_{bk}(\phi)$ и $\sigma_e(\phi)$ используют модифицированное уравнение Дарси для течения в пористой среде в виде $f_{bk}(\phi) = -k(\phi)\Delta\rho g\phi^2 / \mu$, где k – локальная проницаемость. При моделировании уплотнения осадка, модифицированное уравнение Дарси трансформируется в полуэмпирическую зависимость ввиду представления экспериментальной зависимости k от ϕ через корреляционные функции. Если осадок сильно сжимаем, то в седиментационной модели резко возрастает число взаимозависимых констант и коэффициентов эмпирического происхождения.

Таким образом, моделирование стесненного осаждения требует знания функции изменения концентрации по высоте (толщине) осадка, а также функции сжимающего напряжения в осадке. Обе функции представляют собой эмпирические уравнения, где основные константы должны быть определены экспериментальным путем. В свою очередь, измерение профиля концентраций в осаждаемой суспензии и

осадке от высоты и времени требует обширных экспериментальных исследований с применением сложной техники (рентгенокопия, томография и т.п.) или трудоемкой процедуры (пипеточный метод). Измерения в тонких слоях, имеющих порядок толщины осадка в отстойной центрифуге, являются еще более проблематичными, особенно в качестве промышленного теста.

В результате точность и эффективность применения многопараметрических моделей при большом числе взаимосвязанных коэффициентов резко падает. Например, объемная доля твердой фазы в осадке зависит от эффективного сжимающего напряжения, которое в свою очередь определяется величиной ϕ ; проницаемость осадка зависит от ϕ , размера и извилистости пор, которые изменяются во времени в результате изменения структуры и упаковки флокул.

Анализ процесса центробежного осаждения

В качестве объекта исследования был выбран активный ил (далее АИ) ОАО «Нафтан» г. Новополюцка, очистные сооружения которого производят 130 тыс. т/год. Эксперименты проводились как с избыточным активным илом (ИАИ), так и с илом, прошедшим промышленное центрифугирование (АИЦ) с добавлением флокулянта марки Седипур.

Совокупное влияние всех факторов на центрифугирование проявляется в кинетической кривой процесса. Исходя из дисперсного состояния избыточного активного ила, процесс центрифугирования можно условно разделить на три стадии, продолжительность которых определяется агрегатным состоянием дисперсии.

1. Если система не структурирована, то, в зависимости от величины объемной доли твердой фазы, присутствует начальная стадия свободного, когда объем фугата $V \propto t$, или стесненного осаждения, $V \propto t^n$, $n < 1,0$. Доля объема фугата по отношению к равновесному объему фугата, полученная на стадии свободного осаждения тем больше, чем меньше концентрация твердой фазы. Для ИАИ эта стадия центрифугирования преобладает, а для структурированной системы (АИЦ) может отсутствовать.

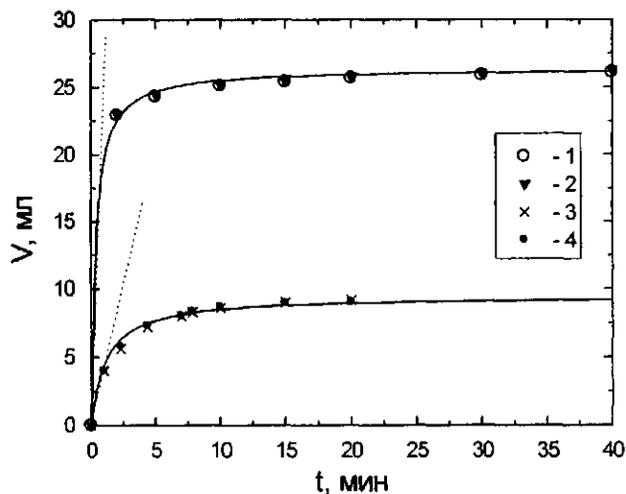
2. Стадия формирования «первичного» осадка, когда агрегаты частицы или флокулы под действием центробежного давления формируют скелет осадка. На этой, промежуточной, стадии происходит вытеснение воды из пространства между флокулами в объем фугата. К механизму осаждения добавляется процесс отжима жидкости из осадка.

3. Завершающая стадия - уплотнение сформировавшегося осадка, когда за счет сжатия осадка выдавливается часть поровой жидкости флокул по фильтрационному механизму. Осадок приближается к равновесному состоянию.

Стадии 2 и 3 характерны для концентрированной системы и могут быть объединены в один процесс - фильтрационное удаление жидкости из осадка. Для сжимаемых осадков процесс отжима налагается на процесс осаждения, и процесс центрифугирования приобретает сложный вид. Для осадков типа АИЦ процесс обезвоживания может полностью протекать в стадии 3.

Отметим, что для систем типа ИАИ, когда дисперсная фаза в своем составе имеет большой объем связанной жидкости, в отличие от суспензий с минеральной дисперсной фазой, резкие границы между перечисленными выше стадиями отсутствуют.

Воспроизводимость экспериментальных данных. На рис. 2 в качестве примера приведены экспериментальные данные для избыточного активного ила (ИАИ) и повторно отцентрифугированного (АИЦ) с одинаковым содержанием органики в твердой фазе. Измерения дают удовлетворительную воспроизводимость измерений с вариацией, не превышающей 6%. Пунктирные прямые соответствуют начальному линейному участку накопления фугата.



воспроизводимости измерений с вариацией, не превышающей 6%. Пунктирные прямые соответствуют начальному линейному участку накопления фугата.

Рис. 2. Зависимость объема фугата V (мл) от продолжительности центрифугирования t (мин) при $K_p = 2667$:

1 и 2 – ИАИ (начальная концентрация АСВ 1,8 %, конечная – 11,05 %); 3 и 4 – АИЦ (начальная концентрация АСВ 10,6 %; конечная – 15,8 %). Пунктиры – начальный линейный участок

Начальный период центробежного осаждения. Как видно из примера (см. рис. 2), начальный наклон и кривизна функции $V = f(t)$ зависит от концентрации твердой фазы, а при $t \rightarrow \infty$ функция стремится к равновесному объему фугата V_p . Отношение тангенса угла наклона в начале процесса зависимостей 1 и 2 соответственно к зависимостям 3 и 4 равно в среднем 7,64, а отношение начальных концентраций по АСВ (АИЦ)/(ИАИ) = 5,9.

Очевидно, что с увеличением начальной концентрации ИАИ скорость осаждения уменьшается, а вклад второй стадии обезвоживания – уплотнение осадка – возрастает. Например, в опытах с АИЦ, вторая стадия процесса обеспечивает примерно 1/2 общего объема полученного фугата.

На начальной стадии процесса центрифугирования изменение объема фугата V от времени близко к линейному: $V \sim U' \cdot t$ или $V/t \sim U'$, где V/t – средняя скорость обезвоживания (средняя скорость получения фугата), а U – средняя скорость стесненного осаждения, определенная по первой точке измерения объема фугата. Так как линейная часть процесса быстротечна, то более корректно говорить о начальной скорости U в момент времени $t = 0$, т.е. $dV/dt|_{t=0} = U$, которая может быть рассчитана на основе разработанной нами модели совместно с долей свободной жидкости в исходной суспензии [9].

Без оценки количества связанной жидкости теоретически трудно количественно охарактеризовать процесс обезвоживания АИ. От доли связанной воды зависит плотность агрегированной твердой фазы, объемная доля твердого вещества в суспензии и осадке, а также другие характеристики, включающие в себя плотность и объемную долю флокул: скорость осаждения, проницаемость, сжимаемость и т.д.

Ниже проведен дополнительный анализ полных кинетических зависимостей центрифугирования с целью определения более приемлемого подхода к моделированию центробежного обезвоживания активного ила в широком диапазоне концентрации твердой фазы.

Исходя из наличия двух механизмов обезвоживания: осаждения и отжима (фильтрации), общий объем отжатой жидкости равен сумме объемов, полученных за счет каждой из стадий процесса. Вклад каждого из процессов в объем фугата изменяется во времени. Поскольку объем фугата на каждой стадии имеет степенную зависимость от времени вида $V \propto t^n$, где $n \leq 1$, то можно предположить, что кинетические зависимости в двойных логарифмических координатах близки к линейной: $\lg(V) \propto n \lg(t)$ или могут быть аппроксимированы серией линейных отрезков.

На рис. 3 в качестве примеров показаны зависимости объема фугата от времени центрифугирования для различных типов АИ (исходный АИ, АИЦ и предварительно интенсивно перемешанный АИЦ) и некоторых способов обработки (ИАИ обработанный флокулянт, АИЦ с добавкой цемента и АИЦ, прошедший метаногенную обработку). Экспериментальные данные хорошо согласуются с предположением о линейной модели $\lg(V) \propto n \lg(t)$. Другие экспериментальные данные, не представленные здесь, имеют схожие зависимости.

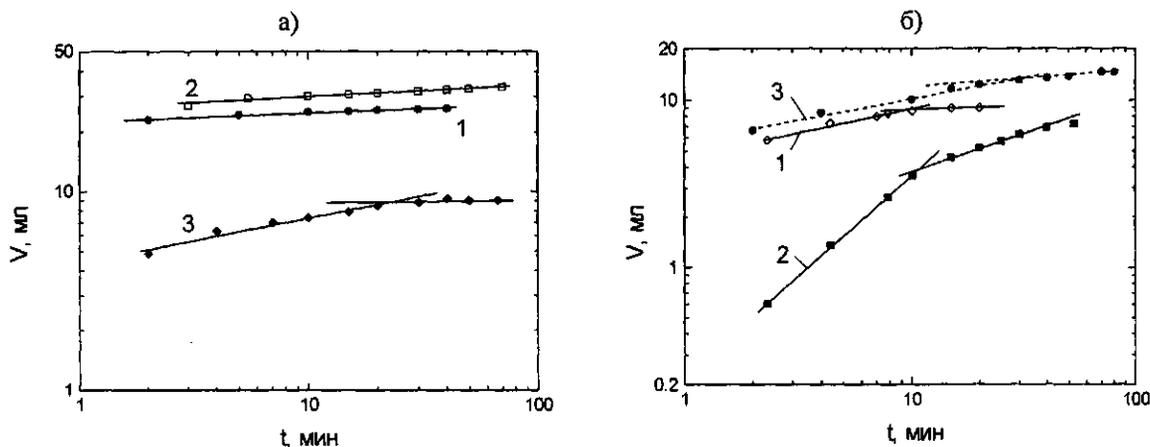


Рис. 3. Экспериментальные данные по центрифугированию АИ в характеристических координатах $\lg(V) - \lg(t)$:

- а) 1 - ИАИ 1,6 % АСВ; 2 - ИАИ + флокулянт «Седипур» 11,9 мг/г АСВ;
- 3 - АИЦ, прошедший метаногенную обработку 16,64 % АСВ;
- б) 1 - АИЦ 10,6 % АСВ; 2 - АИЦ 11,67 % АСВ;
- 3 - АИЦ 11,7% АСВ + цемент в количестве 50 % от АСВ

Таким образом, суммарный объем фугата в области экспериментальных измерений можно представить в следующей форме:

$$\ln(V) = \ln(V_{\text{чо}}) + \ln(V_f), \quad (4)$$

где $V_{\text{чо}}$ – объем фугата, полученный за счет осаждения; V_f – объем фугата, полученный за счет отжима жидкости из осадка – сложные функции времени и свойств суспензии, причем $V_f = V - V_{\text{чо}}$.

Зависимость (4) взята за основу построения обобщенной кинетической модели центрифугирования активного ила.

Выводы

1. Сложность непосредственного применения приведенных выше общепринятых уравнений к активному илу заключается в том, что в зависимости от концентрации, соотношения органической и минеральной компонент дисперсной фазы, возраста АИ и характера его физико-химической обработки степень агрегации частиц и прочность агрегатов могут быть различны. С уменьшением размера исходных частиц степень агрегации и соответственно пористость осадка увеличиваются. Наличие связанной влаги не дает возможности однозначно определить такие величины, как пористость, средний размер агрегатов в деформируемом осадке, более того, при увеличении степени агрегации структура осадка имеет более низкую прочность и, соответственно, делает их более сжимаемыми. Что в свою очередь делает перечисленные величины переменными во времени.

2. В процессе центрифугирования избыточного активного ила можно выделить 3 основных стадии:

- стесненное осаждение;
- первичное формирование осадка;
- уплотнение с отжимом образовавшегося осадка.

3. Используя экспериментальные данные по кинетике центрифугирования конкретного типа осадков и учитывая наличие двух механизмов обезвоживания (осаждение и отжим), можно предложить схему центрифугирования и принцип организации процесса обезвоживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. - Л.: Химия, 1982.-288 с.
2. Соколов В.И. Центрифугирование. - М: Химия, 1976. - 408 с.
3. Burger R., Concha F., Tiller F.M. Applications of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation processes // Chemical Engineering Journal. - 2000. - Vol. 80. - P. 105 - 117.
4. Garrido P., BUrger R., Concha F. Settling velocities of particulate systems: 11. Comparison of the phenomenological sedimentation-consolidation model with published experimental results // Int. J. Miner. Process. ~ 2000.-Vol. 60.-P.213-227.
5. Tiller F.M., Hsyung N.B. How does percent solids affect centrifuge cakes? // Chem. Eng. Progress. - 1993. - №8.-P. 20-28.
6. Numerical methods for the simulation of the settling of flocculated suspensions / R. Bürger, S. Evje, K.H. Karlsen, K.-A. Lie // Chemical Engineering Journal. - 2000. - Vol. 80. - P. 91 - 104.
7. Tiller F.M., Hsyung N.B. Unifying the theory of thickening, filtration, and centrifugation // Wat. Sci. Tech. - 1993.-Vol. 28.-№ 1.-P. 1-9.
8. Шамсутдинов У.Г. Численное моделирование процесса фильтрования с образованием осадка // Оборудование для разделения жидких неоднородных систем. - М.: НИИХИММАШ, 1988. - С. 31 - 37.
9. Методика определения доли свободной жидкости в активном иле / И.А. Ельшина, Г.Н. Абаев, А.И. Ельшин, Р.А. Андреева // Материалы, технологии, инструменты. - 2003. - № 2. - С. 88 - 93.