

Тусупбаев Н.К., Рулев Н.Н., Есенгазиев А.М., Билялова С.М.

УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦИЯ ЫКМАСЫ МЕНЕН МОДЕЛДИК СИСТЕМАЛАРДАГЫ КОЮУЛАНТУУ ПРОЦЕССТЕРИН ИЗИЛДӨӨ

Тусупбаев Н.К., Рулев Н.Н., Есенгазиев А.М., Билялова С.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ УЛЬТРАФЛОКУЛЯЦИИ

N.K. Tusupbaev, N.N. Rulev, A.M. Yesengaziev, S.M. Bilyalova

RESEARCH OF THE CONCESS OF CONSTRUCTION OF MODEL SYSTEMS BY THE METHOD OF ULTRAFLOCCULATION

УДК: 622.794

Бул жумушта ультрафлокуляция ыкмасын колдонуп, өндүрүштүк жана моделдик суспензиялардын фильтрациялык жана седиментациялык мүнөздөмөлөрдү жакшыртуу үчүн изилдөө иштери жүргүзүлдү. Теоретикалык жоболорго жана эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжасында негизделип аныкталды: чөйрөнүн градиентинин мүнөздүү ылдамдыгы $G=2000-4000\text{ c}^{-1}$ ошондой эле интенсивдүүлүгү боюнча бара-бара стадиялык начар баскычтык төмөндөшү (1000 -нан 30 c^{-1} дейин) гидродинамикалык иштеп чыгууну колдонууда, суюлтулган ($< 1\text{ г/л}$ қатты) төмөн дисперсти ($< 1\text{ мкм}$) суспензиялардын флокуляциялык жана андан кийин медикаменттик бөлүнүүсүн кыйла жакшыртууга болот. Ультрафлокуляция эрежеси флокуляция убакытын, флокулянт чыгымдардын өлчөмү азайтат жана нурлануунун даражасын жана натыйжалуулугун жогорулатат. Бул натыйжа кыска мөөнөттө суспензияны цилиндрлик флокуляторда катуу пайда болгон бир тектүү эмес гидродинамикалык талаада иштеп чыгууда жеткизилет.

Негизги сөздөр: ультрафлокуляция, седиментация, флокула, ультрафлокулятор, флокулянттар, гидродинамикалык иштеп чыгуу.

В работе проведены исследования по улучшению седиментационной и фильтрационной характеристики модельных и промышленных суспензий с использованием метода ультрафлокуляции. На основе теоретических положений, а также результатов экспериментальных исследований установлено, что при использовании жесткой гидродинамической обработки, характеризующуюся градиентом скорости среды $G = 2000-4000\text{ c}^{-1}$, а также последующую постадийную ступенчато убывающую по интенсивности (от 1000 до 30 c^{-1}) мягкую гидродинамическую обработку можно достичь существенного улучшения результатов флокуляции и последующего седиментационного разделения разбавленных ($< 1\text{ г/л}$ твердого) тонкодисперсных ($< 1\text{ мкм}$) суспензий. Принцип ультрафлокуляции позволяет существенно уменьшить время флокуляции, расхода флокулянта, степень осветленности и повысить ее эффективность. Этот результат достигается за счет кратковременной обработки суспензии в сильнонеоднородном гидродинамическом поле, формируемом в цилиндрическом флокуляторе.

Ключевые слова: ультрафлокуляция, седиментация, флокула, ультрафлокулятор, флокулянты, гидродинамическая обработка

In this paper, studies have been conducted to improve the sedimentation and filtration characteristics of model and industrial suspensions using the ultra-flocculation method. On the basis of theoretical positions, as well as the results of experimental studies, it was established that when using rigid hydrodynamic processing, characterized by the velocity gradient of the medium $G = 2000-4000\text{ s}^{-1}$, as well as the subsequent stepwise, stepwise decreasing in intensity (from 1000 to 30 s^{-1}) soft hydrodynamic treatment can achieve a significant improvement in the results of flocculation and subsequent sedimentation separation of diluted ($< 1\text{ g / l solid}$) fine ($< 1\text{ }\mu\text{m}$) suspensions. The principle of ultra-flocculation can significantly reduce the time of flocculation, flocculant consumption, the degree of lightness and increase its effectiveness. This result is achieved due to the short-term treatment of the suspension in a strongly inhomogeneous hydrodynamic field formed in a cylindrical flocculator.

Key words: ultraflocculation, sedimentation, flocculation, ultra flocculator, flocculant, hydrodynamic treatment.

Введение. Обычно процесс сгущения продуктов обогащения флокулянтами происходит в ламинарном режиме, при этом для улучшения флокулирующей активности нужно подбирать флокулянты с большой молекулярной массой с высокой плотностью заряда или макромолекулы с достаточной гидрофобностью, придающие им высокую гибкость [1,2]. Однако указанные флокулянты требуют специального продолжительного приготовления и их растворы очень медленно распределяются в объеме суспензии. В работе [3] показано, что присутствии смесей анионного и катионного суперфлокулянтов, независимо от их состава и порядка введения компонентов в суспензию кварца, частицы приобретают отрицательный ζ -потенциал, характерный для частиц, адсорбирующих только анионный суперфлокулянт, но при этом наблюдается синергизм флокулирующего действия.

Однако суперфлокулянты или их смеси имеют один недостаток. В силу огромной молекулярной

массы, они обладают очень низкой подвижностью, что создает проблемы при смешивании исходного раствора флокулянта с суспензией и равномерном распределении его молекул в объеме обрабатываемой суспензии и, следовательно, на поверхности частиц.

Вследствие этого, в суспензии остается очень много несвязанных между собой мелких частиц или агрегатов. Эти частицы не только снижают качество осветленной воды, существенно затрудняют обезвоживание осадка фильтрованием или центрифугированием. Обусловлено это тем, что несвязанные мелкие частицы могут перемещаться в порах фильтрационного чека и прикрывает их, увеличивая тем самым гидравлическое сопротивление чека и снижая скорость фильтрации. Кроме того, эти частицы способны проникать и накапливаться в межволоконном пространстве фильтрующего материала, снижая срок его службы в несколько раз.

Преодоление вышеописанных трудностей использования флокулянтов, как впервые было показано в работах [4,5], может быть достигнуто путём применения специальной гидродинамической обработки суспензии в процессе введения флокулянта и сразу после него. Такая обработка, получившая название «ультра-флокуляция» [5], позволяет не только быстро и равномерно распределить молекулы флокулянта по объёму суспензии, но и создать благоприятные условия для быстрого формирования плотно упакованных и прочных флокул. При этом практически все частицы оказываются в связанном состоянии, что существенно облегчает дальнейшее обезвоживание осадка.

Тестирование серию флокулянтов фирмы Kemira с помощью лабораторного прибора "Ультрафлок-Тестер" при сгущении отвальных хвостов флотации Жезказганской обогатительной фабрики показало, что наиболее эффективным оказался анионный флокулянт марки «А-150». Установлено, что при его расходе 90 г/т достигается наибольший флокулирующий эффект. При этом, оптимальное значение гидродинамической обработки находится в диапазоне: 900-1100 с⁻¹, а время полного осветления суспензии анионным флокулянт составил 25 секунд [6].

Вместе с тем, хорошо известно, что при увеличении градиента скорости среды G уменьшается максимальный размер флокул, так как более крупные флокулы дробятся под действием вязких напряжений, действующих со стороны дисперсионной среды. Отсюда следует, что в начальные моменты процесса флокуляции можно использовать достаточно интенсивную (большие значения G) гидродинамическую

обработку. По мере же роста флокул, интенсивность обработки необходимо снижать практически до нуля с целью получения крупных быстро седиментирующих флокул. В работе [4] было показано, что оптимальный режим гидродинамической обработки $G(t)$ и соответствующая ему кинетика роста среднего размера флокул $d_F(t)$ описываются уравнениями:

$$G_i(t) = G_m S^{2/3} \left(1 + \frac{t}{t_{ci}} \right)^{\frac{2D-9}{D}} \quad (1)$$

$$d_F = d_p \left(1 + \frac{t}{t_{ci}} \right)^{\frac{3}{D}} \quad (2)$$

где d_p – размер флокулируемых частиц, t – время обработки, D и S параметры, отражающие фракталоподобную структуру флокул (размерность фрактала и структурный коэффициент) [5], t_{ci} – характеристическое время идеального процесса, определяемого формулой:

$$t_{ci} = \frac{9\pi S^{1/3}}{8DG_m \alpha \varphi} \quad (3)$$

φ – объемная концентрация суспензии, α – вероятность агрегирования флокул (частиц) в процессе столкновения в неоднородном гидродинамическом поле. Величина G_m входящая в уравнения (1) - (3), представляет собой параметр, характеризующий максимальную допустимую интенсивность гидродинамической обработки суспензии в начальный момент обработки, когда взаимодействуют между собой отдельные частицы и выражается формулой

$$G_m = \frac{3U}{\pi^2 \eta d_p^3} \quad (4)$$

где U – парная энергия связи частиц во флокуле, η – динамическая вязкость суспензии.

Из соотношения (4) следует, что допустимая интенсивность начальной (наиболее жесткой) гидродинамической обработки G_m зависит от энергии связи U и размера частиц d_p . В качестве примера в табл. 1 представлены значения d_p , U и G_m для водных суспензий кварца, угля и бентонитовой глины по аналогии, приведенные в работе [7].

Таблица 1

Максимальный градиент скорости G_m , рассчитанный на основе формулы (3) для различных водных суспензий

Водная суспензия	Флокулянт	\bar{d}_p , мкм	U 10^{-14} Дж	G_m 10^6 c^{-1}
Кварца	3,3 мг/л С-494	0,51	2,2	96
Угля	3,8 мг/л N-300	0,41	0,63	47
Бентонитовой глины	2,7 мг/л С-496	0,28	0,18	65

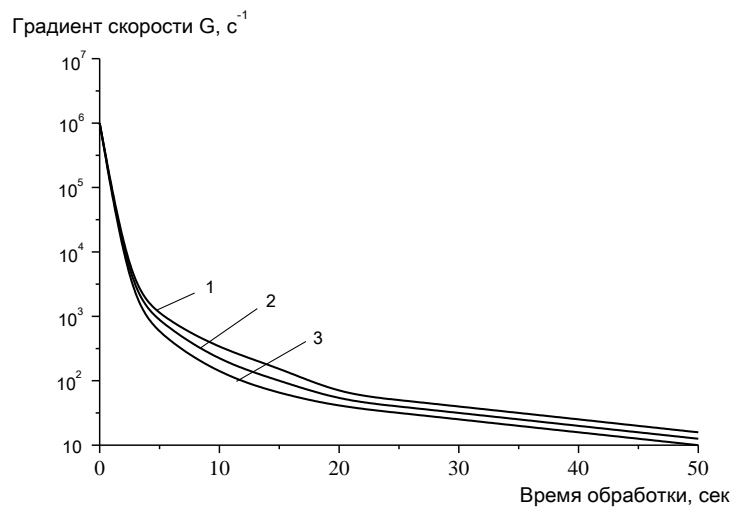


Рис. 1. Диаграммы идеальных (пунктирные линии) и реального (ступенчатая линия) режимов УФ-гидродинамической обработки $G(t)$, рассчитанные по формуле (1) для разбавленных ультрадисперсных суспензий, представленных в таблице 1: 1- уголь; 2- бентонитовая глина; 3- кварц. Параметры расчета: $\varphi = 10^{-4}$, $\alpha = 0.1$, $S = 0.74$, $D = 2.3$.

Из таблицы 1 видно, что допустимое значение величины G_m может достигать десятков миллионов обратных секунд. Следовательно, на начальной стадии флокуляции, когда необходимо обеспечить быстрое и равномерное растворение молекул флокулянта и доставку их к поверхности частиц, можно кратковременно использовать сильно-неоднородные гидродинамические поля без ущерба для процесса флокуляции.

В качестве примера на рисунке 1 представлены рассчитанные по формуле (1) зависимости $G(t)$ для идеального режима гидродинамической обработки суспензий, свойства которых представлены в таблице 1. К сожалению, на практике очень трудно обеспечить идеальный режим гидродинамической обработки. Кроме того, использование полей с интенсивностью G порядка $10^7 c^{-1}$ связано со значительными техническими трудностями и колоссальными энергетическими затратами. В этой связи, без особого ущерба для скорости и качества процесса, в [4] был предложен постадийный режим гидродинамической обработки суспензии, показанный на рисунке 1 ступенчатой линией. Таким образом, интенсивная кратковременная гидродинамическая обработка осуществляется только

на первой самой ранней стадии. На последующих же стадиях интенсивность обработки значительно ниже. Технически такой режим обработки легко обеспечить путем последовательного соединения динамического (первая стадия) и статических (последующих стадий) миксеров, обеспечивающих первичную (жесткую) и вторичную (мягкую) обработку. Как будет показано ниже на конкретных примерах, оба типа обработки играют существенную роль для улучшения процесса флокуляции разбавленных суспензий.

Для изучения влияния режима гидродинамической обработки на процесс флокулярно-седиментационной сепарации хвостов обогащения руд в настоящее время получает распространение метод и установка, схематически показанная на рисунке 2. В процессе эксперимента обрабатываемая суспензия, а также раствор флокулянта, подавались непосредственно в проточный ультрафлокулятор, где в течение $t_o = 5$ секунд осуществлялась первичная жесткая обработка (собственно «ультра-флокуляция»).

В качестве ультрафлокулятора использовался цилиндрический флокулятор Куэтта (пара коаксиальных цилиндров), диаметр и высота ротора которого составлял 3 см, а ширина зазора – 2 мм. Путём

изменения скорости вращения ротора величину осредненного градиента скорости среды в ультрафлокуляторе G_o можно было менять в диапазоне от 0 до 24000 с^{-1} . Зависимость величины G_o от скорости вращения ротора оценивали по соотношению Колмогорова:

$$G = \sqrt{\varepsilon/\nu} \quad (5)$$

где ν – кинематическая вязкость среды, а ε – диссипация кинетической энергии. Значение величины ε вычисляли на основании данных о разности температур суспензии на входе и выходе ультрафлокулятора ΔT по формуле:

$$\varepsilon = \frac{c_p q}{w} \Delta T \quad (6)$$

где c_p – теплоемкость среды, q – суммарный объемный расход суспензии и раствора флокулянта, w – объем полости флокулятора. С выхода ультрафлокулятора, суспензия поступала в последовательность статических миксеров 1-4, представлявших собой полихлорвинильной – трубки [8,9]. Диаметр и длина трубок подбирались таким образом, чтобы средние значения градиентов скорости жидкости в них G_i и соответствующие времена обработки t_i наилучшим образом соответствовали идеальному режиму (рис. 1).

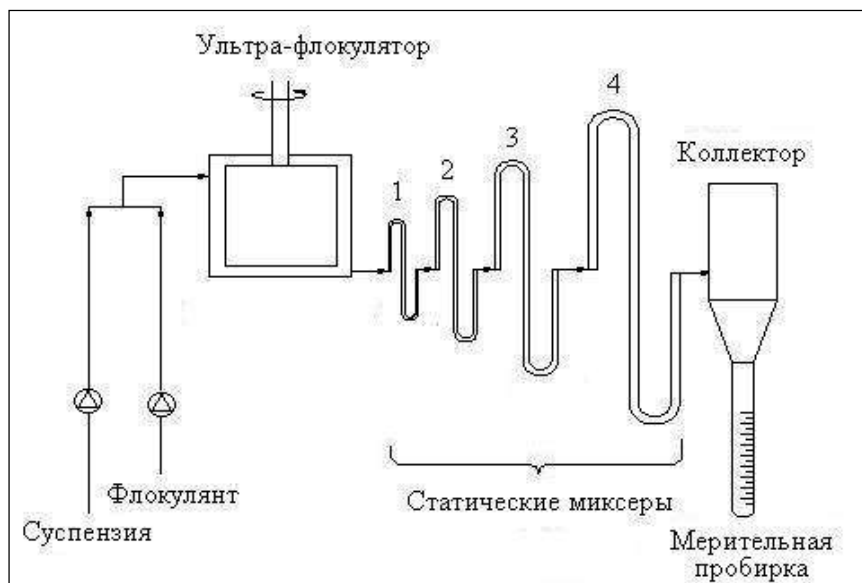


Рис. 2. Установка для изучения ультра-флокуляции разбавленных тонкодисперсных суспензий: 1-4 – трубчатые статические миксеры.

Таблица 2

Параметры трубчатых статических миксеров

Статический миксер, №	Диаметр, мм	Длина, см	Время обработки, t, с	Градиент скорости, G_i , сек^{-1}
1	2.2	36	1.18	970
2	3.3	41	2.9	90
3	4.2	47	5.7	30
4	5.3	47	8.8	18.3

Параметры статических миксеров, а также соответствующие значения G_i и t_i представлены в таблице 2. Соответствующие значения G_i также оценивались по формуле (4), а величины ε_i по гидравлическому сопротивлению трубок и расходу суспензии q , которая во всех экспериментах составляла $1 \text{ см}^3/\text{с}$. При этом, величины G_i вычислялась по формуле:

$$G_i = \frac{g \cdot \Delta h_i q}{S_i} \quad (7)$$

где g – ускорение сил тяжести, S_i – площадь сечения трубки, Δh_i – высота гидростатического столба, обеспечивающего расход жидкости q .

С выхода последнего статического миксера обработанная суспензия поступала в коллектор с кони-

ческим дном объёмом 230 мл. Коллектор был снабжен мерительной трубкой, с помощью которой измерялся объем влажного осадка. После заполнения коллектора обработанной суспензией ей давали определенное время отстояться, после чего измеряли объем осадка и остаточную концентрацию или мутность осветленного раствора в зависимости от времени. После этого осадок отфильтровывали и высушивали для определения удельного объема осадка $V_{уд.}$ по формуле:

$$V_{уд.} = \frac{V}{m} \quad (8)$$

где V - объем влажного осадка, m - его сухая масса.

В качестве модельной была взята разбавленная суспензия (концентрация твердого 0.3 г/л) кварца в дистиллированной воде. Соответствующие размеры и энергии связи частиц, а также используемые флокулянты представлены в таблице 1.

На рисунке 3 представлены зависимости остаточной концентрации частиц кварца в осветленной воде $C_{ост.}$ после 30 мин отстаивания в коллекторе от интенсивности обработки суспензии в динамическом миксере (ультра-флокуляторе) и концентрации флокулянта. Из приведенных графиков видно, что в области значений $G_o = 2000-4000 \text{ с}^{-1}$ наблюдается ярко выраженный минимум остаточной концентрации, который углубляется по мере увеличения концентрации флокулянта в диапазоне 1 – 4 мг/л. Увеличение $C_{ост.}$ в области значений $G_o > 3000-4000 \text{ с}^{-1}$ обусловлено тем, что время формирования флокул максимального размера t_{max} во флокуляторе зависит от интенсивности обработки G_o . Если исходить из уравнения Смолуховского для ортокINETической коагуляции, то легко показать, что $t_{max} \sim 1/G$. Поскольку в данном эксперименте суспензия обрабатывалась в ультра-флокуляторе

одно и тоже время $t_o = 5 \text{ с}$, то отсюда следует, что при очень малых G_o , $t_o \ll t_{max}$, а при очень больших G_o , $t_o \gg t_{max}$. В первом случае, суспензии просто не хватает времени нахождения во флокуляторе, чтобы полностью сфлокулироваться и сформировать флокулы максимального размера. В результате в воде остается очень много несфлокулированных мелких частиц, которые очень медленно седиментируют. Во втором случае, флокулы достигают максимального размера задолго до окончания обработки в ультра-флокуляторе. После этого они продолжают многократно агрегировать и дробиться, образуя множество относительно мелких, медленно седиментирующих осколков. Кроме того, следует учесть, что с увеличением G_o уменьшается также и максимальный размер стабильных в данном гидродинамическом поле флокул dF_{max} , что снижает скорость их седиментации. Это объяснение достаточно наглядно подтверждается микрофотографиями суспензий, представленными в [8]. Таким образом, минимум на кривых $C_{ост.}(G_o)$ соответствует значениям G_o , при которых, $t_o \approx t_{max}$. Отсюда следует, что с уменьшением времени обработки в ультра-флокуляторе оптимальное значение G_o будет несколько смещаться в область больших значений. Из приведенных на рисунке 3 кривых следует, что использование ультра-флокуляционной обработки позволяет не только увеличить в несколько раз качество осветленной воды, но в несколько раз снизить потребление флокулянта. Действительно, если сравнить кривые 1 и 4 на рисунке 3, то становится понятно, что тот же эффект осветления, который достигается при большой дозе флокулянта, но без ультра-флокуляционной обработки, можно получить при дозе флокулянта, которая в 2-3 раза меньше, но с использованием оптимальной ультра-флокуляционной обработки.

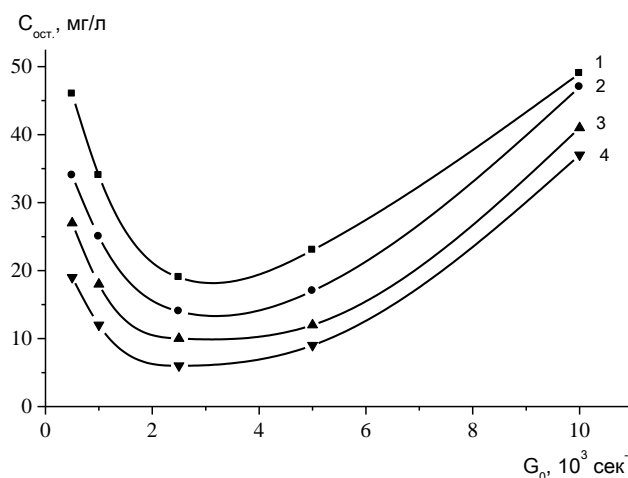


Рис. 3. Зависимость остаточной концентрации $C_{ост.}$ суспензии кварца (кварц, дистиллированная вода, 0,3г/л, pH-7.5) после 30 мин седиментации в коллекторе от интенсивности гидродинамической обработки в ультра-флокуляторе G_o . Концентрация флокулянта С-494 мг/л: 1.8(1); 2.2(2); 2.9(3); 3.8(4).

Как уже отмечалось, ультра-флокулярная обработка позволяет достичь значительно более высокой плотности упаковки частиц, чем обычное перемешивание. Это очень хорошо подтверждается семейством кривых приведенных на рисунке 4, где показана зависимость удельного объема глины от интенсивности обработки в ультра-флокуляторе G_0 при различных временах седиментации в коллекторе. Из рисунка видно, что при временах отстаивания менее одного часа минимум $V_{уд.}(G_0)$ наблюдается при $G_0 \approx 1000 \text{ с}^{-1}$. При временах же отстаивания более 1 часа соответствующий, но более глубокий минимум зависимости $V_{уд.}(G_0)$ наблюдается при $G_0 \approx 2500 \text{ с}^{-1}$. Такое поведение осадка можно объяснить тем, что при низких интенсивностях ультра-флокулярной обработки пер-

вичные флокулы значительно менее плотно упакованы, но зато они значительно крупнее и поэтому быстро формируют плотный осадок. При больших же интенсивностях обработки первичные флокулы значительно меньше в размере и поэтому они медленнее образуют плотный осадок. Однако, в силу того, что в последнем случае плотность упаковки флокул значительно выше, со временем они дают более плотный осадок, чем флокулы сформированные в более слабом неоднородном гидродинамическом поле. Эти результаты также согласуются с данными работ [10, 11].

Таким образом, как следует из данных представленных на рисунке 4, ультра-флокулярная обработка позволяет не только ускорить процесс седиментационного разделения фаз суспензии, но и, как минимум, в 2 раза, уменьшить удельный объем осадка.

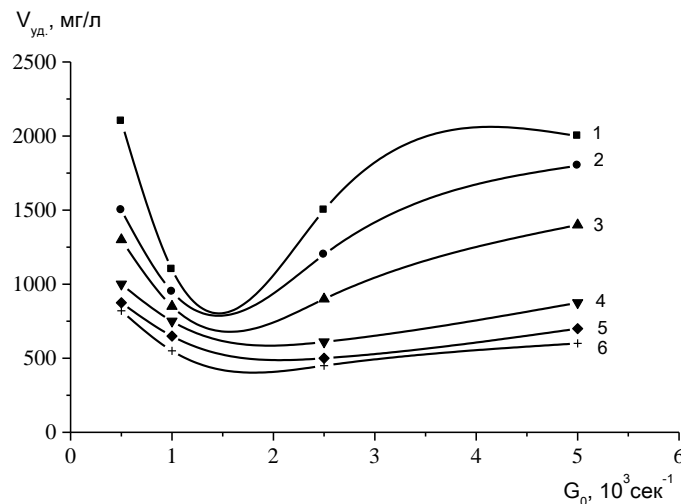


Рис. 4. Зависимость удельного объема осадка $V_{уд.}$ суспензии кварца (дистиллированная вода, кварц, предварительно обработанный ультразвуком, концентрация твердого – 0,3 г/л, С-494 – 1,8 мг/л) от интенсивности гидродинамической обработки в ультра-флокуляторе G_0 при различных временах седиментации в коллекторе, час: 0,25(1); 0,5(2); 1,0(3); 2,0(4); 3,0(5); 4,0(6).

Альтернативно, ультра-флокулярная обработка может быть использована для экономии флокулянта. Действительно, сравнивая кривые 2 и 4 на рисунке 4, можно заметить, что тот же эффект уплотнения осадка, который достигается при большой дозе флокулянта, но без ультра-флокулярной обработки, можно получить при использовании в 3-4 раза меньшей дозы флокулянта, но с применением оптимальной ультра-флокулярной обработки.

В отличие от концентрированных суспензий, при обработке разбавленных суспензий существенное значение имеет не только жесткая, но и мягкая обработка. Подтверждением тому служат данные представленные на рисунке 5, где показаны зависимости остаточной мутности осветленной воды от времени и

интенсивности обработки в статическом миксере $Tu(G_i, t_i)$ суспензии кварца. Для того, чтобы получить более выраженные результаты, эксперименты проводились на установке, схематически показанной на рисунке 2 с тем отличием, что из всех трубчатых статических миксеров использовался только один (3-й или 4-й), т.е. мягкая гидродинамическая обработка осуществлялась при $G_2 = 90 \text{ с}^{-1}$ или $G_3 = 30 \text{ с}^{-1}$ [11].

Время мягкой обработки изменяли путем изменения длины трубки.

Как следует из рисунка 5, остаточная мутность осветленной воды существенно уменьшается при увеличении времени и интенсивности мягкой гидродинамической обработки.

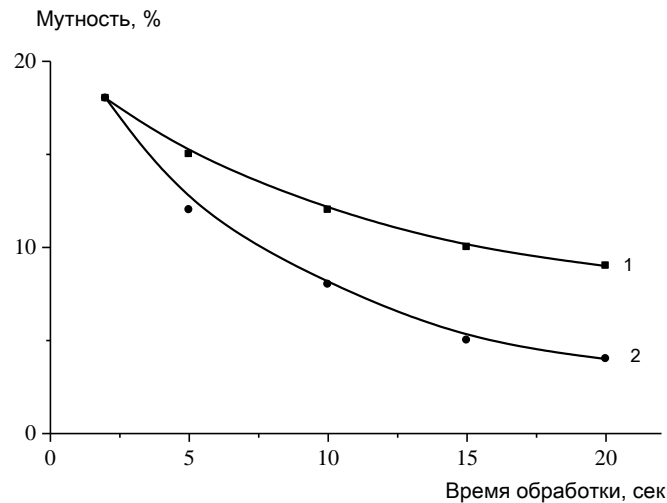


Рис. 5. Остаточная мутность суспензии кварца в зависимости от времени мягкой обработки при разных значениях G , с^{-1} : 30(1); 90(2).

Исходя из вышеизложенных теоретических положений, а также результатов экспериментальных исследований можно заключить нижеследующее:

Используя жесткую гидродинамическую обработку, характеризующуюся градиентом скорости среды $G = 2000\text{--}4000 \text{ с}^{-1}$, а также последующую постадийную ступенчато убывающую по интенсивности (от 1000 до 30 с^{-1}) мягкую гидродинамическую обработку можно достичь существенного улучшения результатов флокуляции и последующего седиментационного разделения разбавленных ($<1 \text{ г/л}$ твердого) тонкодисперсных ($<1 \text{ мкм}$) суспензий, а именно:

- ускорение процесса седиментации сфлокулированных суспензий более чем в 2 раза;
- уменьшение остаточной концентрации твердого в воде в 4-10 раз;
- уменьшение расхода флокулянта в 2-3 раза;
- уплотнение осадка твердой фазы в 1.5-2 раза.

В последнее время получены сравнительные результаты по влиянию на эффективность флокуляции дисперсных систем как в статическом трубчатом флокуляторе, так и в динамическом флокуляторе Куэтта [12].

В этих исследованиях использовались водные суспензии ультратонкого карбоната кальция ($<7 \text{ мкм}$) и тонкодисперсного кремнезема ($<90 \text{ мкм}$). Было установлено, что обработка ультратонкой суспензии карбоната кальция в статическом флокуляторе дает в диапазоне $400\text{--}450 \text{ с}^{-1}$ выраженный первичный максимум в зависимости эффективности флокуляции от скорости сдвига. Увеличение концентрации суспензии до 70 г/л и выше привело к небольшому вторичному максимуму эффективности флокуляции в области

около 950 с^{-1} . Это объяснено более высокой скоростью растворения флокулянта и соответствующим увеличением сил адгезии частиц в хлопьях, которые противодействуют разрушающим их вязким силам. При обработке суспензией диоксида кремния первичные и вторичные пики возникают как при малых, так и при высоких концентрациях суспензии, но в последнем случае они гораздо более выражены и сопоставимы по величине [12].

Литература:

1. Баран А.А. Полимерсодержащие дисперсные системы. - Киев: Наукова думка, 1986. - 244 с.
2. Шабанова Н.А., Силос И.В. Флокуляция коллоидного кремнезема водорастворимыми полиэлектролитами // Коллоидн. журн. - 1993. - Т.55. - №1. - С. 152-157.
3. Тусупбаев Н.К., Ержанова Ж.А., Билялова С.М., Тойланбай Г.А. Флокуляция суспензии кварца в присутствии суперфлокулянтов различного заряда // Комплексное использование минерального сырья. - 2018. - №4. - С. 17-27.
4. Rulyov N.N., Ryshchenko V.R. "Hydrodynamic breaking of dilute oil-in-water emulsions", *Khimiya i Tekhnologiya Vody*. - Vol. 11. - 1989. - 695-697.
5. Rulyov N.N., Karas S.V. "Hydrodynamic destruction of disperse systems", *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 12, 1990. - 887-890.
6. Есенгазиев А.М., Мусина М.М., Ержанова Ж.А., Билялова С.М., Тусупбаев Н.К. Тестирование лабораторного аппарата "Ультрафлотестер" при сгущении суспензии отвальных хвостов // Материалы Межд. научно-практ. конф. «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов». - Алматы, 27-29 сентября 2018. - С. 133-137.

-
7. Rulyov N.N. "Application of ultra-flocculation and turbulent micro-flotation to the removal of fine contaminants from water", *Colloids & Surfaces A*, Vol. 151, 1999a, 283-291.
 8. Rulyov N.N. "Hydrodynamic destruction of waste emulsions in the process of their separation through ultra-flocculation and micro-flotation", *Colloids & Surfaces A*, Vol. 152, 1999b, 11-15.
 9. Rulyov N.N. Ultra-flocculation: Theory, Experiment, Applications // In book "Particle Size Enlargement in Mineral Processing". – Montreal (Canada). - 2004. - P. 197-214.
 10. Tontrup C., Gruy F., Cournil M. "Turbulent Aggregation of Titania in Water", *J. Colloid Int. Sci.*, Vol. 229, 2000, 511-525.
 11. Rulyov N. N., Maes A., Korolyov V. J. "Optimization of hydrodynamic treatment regime in the processes of sorption-flocculation water purification from organic contaminants", *Colloids & Surfaces A*: Vol. 175, 2000, 371-381.
 12. Rulyov N.N., Kravtchenko O., Concha F. Effects of Suspension Dispersity and Concentration on Flocculation Efficiency in Static and Dynamic Flocculators. *Journal of Metallic Material Research*. Vol. 01. 2018. P.9-15.
-