

Исследование процессов коагуляции и осаднения мелких твердых частиц в жидкой среде при ультразвуковом воздействии

Юрий М. Кузовников, *Student Member*, IEEE, [Сергей С. Хмелев](#), *Student Member*, IEEE, [Сергей Н. Цыганок](#), [Владимир Н. Хмелев](#), *Senior Member*, IEEE
Бийский технологический институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – статья посвящена исследованию процесса коагуляции твердых частиц в жидких дисперсных системах под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Установлено, что ультразвуковое воздействие может стать эффективным методом интенсификации процесса очистки буровых растворов.

Ключевые слова – коагуляция, дисперсная среда, ультразвук.

I. ВВЕДЕНИЕ

Коагуляция – это объединение частиц дисперсной фазы в агрегаты вследствие сцепления частиц при их соударениях. Соударения происходят в результате броуновского движения, а также седиментации, перемещения частиц в электрическом поле (электрокоагуляция), механического воздействия на систему (перемешивания, вибрации). Характерные признаки коагуляции – увеличение мутности (интенсивности рассеиваемого света), появление хлопьевидных образований – флокул, расслоение исходно устойчивой к седиментации системы с выделением дисперсной фазы в виде коагулянта [4].

Некоторые области эффективного применения коагуляции:

- 1) подготовка питьевой воды;
- 2) очистка сточных вод и обезвоживание сгущенного ила;
- 3) разделение минералов и пустой породы, очистка хвостов, связующих агентов для производства окатышей в горно-обогатительной промышленности;
- 4) удержание волокна и наполнителей, очистка оборотных и сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности;
- 5) удержание влаги, структурообразователи почв в сельском хозяйстве;
- 6) увеличение нефтеотдачи, очистка буровых растворов, сорбционная очистка разливов нефти в нефтедобывающей промышленности;
- 7) суперабсорбенты для гигиены и косметики;
- 8) фиксаторы красителей, очистка стоков – текстильная промышленность.

Проблема состоит в том, что естественная коагуляция растворенных в жидкой среде частиц в различных условиях протекает по-разному, а порой она и вовсе не возможна.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существуют различные способы интенсификации процесса укрупнения и осаднения частиц, взвешенных в жидкой фазе. Одним из наиболее эффективных способов является воздействие акустическими колебаниями ультразвуковой частоты.

В разных областях промышленности, сельского хозяйства и природопользования существует проблема очистки больших объемов жидких сред, которую можно успешно решить за счет коагуляции загрязняющих частиц с помощью ультразвукового воздействия. Чтобы обеспечить обработку больших объемов жидких сред, необходимы мощные ультразвуковые аппараты с высокой интенсивностью излучения. При этом будут создаваться условия для интенсивной коагуляции на больших расстояниях от ультразвукового излучателя, однако вблизи него будет происходить нежелательное диспергирование частиц. Для достижения максимальной эффективности укрупнения и осаднения твердых частиц в жидкой дисперсной среде с помощью ультразвукового аппарата необходимо произвести исследование и поиск оптимальных условий его использования. Работа выполнена по заказу и при финансировании «Сибирского научно-исследовательского и проектного института рационального природопользования».

III. ТЕОРИЯ

При возбуждении интенсивных ультразвуковых волн в жидкой дисперсной среде протекают процессы образования и схлопывания воздушных пузырьков, инициации акустических течений и микропотоков, областей сжатия и разрежения.

В зависимости от своей физической природы компоненты обрабатываемого раствора претерпевают изменения. В процессе озвучивания в дисперсной среде проходят параллель-

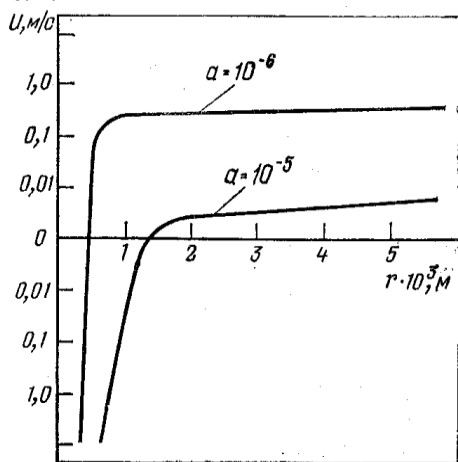
но два противоположных процесса: диспергирования веществ и укрупнения. Мягкие вещества разжижаются и растворяются во всем обрабатываемом объеме, а твердые – образуют агломераты и флоккулы [2].

Укрупнение твердых частиц взвешенных в жидкой среде под воздействием интенсивного ультразвука происходит вокруг пульсирующих газовых пузырьков. Из литературных источников известен некий радиус захвата, рассчитанный на основании анализа расстояния действия сил трения (Стокса) и инерционных сил (Осеена).

$$X_{\text{сд\ddot{o}}} = \sqrt{aR^3 \rho_m / \eta T}$$

где R – радиус пузырька, a – радиус частицы, ρ_m – плотность материала частицы, T – период колебаний пузырька [1].

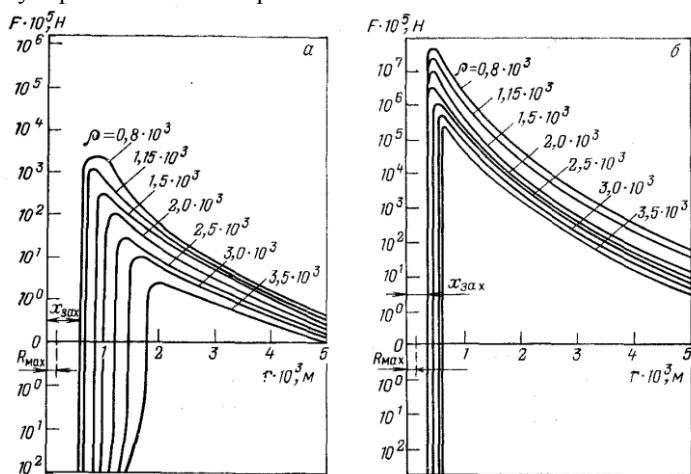
Скорость частицы и направление движения частицы показаны на рис. 1.



33

Рисунок 1 – График скоростей частиц размером a .

Из графика видно, что при движении частиц от пузырька (за радиусом захвата) скорость вначале возрастает, а затем падает до нуля. При движении к пузырьку скорость постоянно возрастает. Зависимость силы, действующей на частицу от плотности материала, радиуса частицы и расстояния от пузырька показана на рис. 2.



а – частицы размером 10^{-5} м; б – частицы размером 10^{-6} м

Рисунок 2 – Изменение силы, действующей на частицу, в зависимости от плотности материала

При уменьшении размеров частиц или при уменьшении их плотности эффективный радиус захвата уменьшается.

По истечении определенного времени устанавливается своеобразное равновесие размеров взвешенных в жидкой фазе твердых частиц. Агломераты в таком случае, в целом, не укрупняются более среднего размера и в то же время не становятся меньше его. В случае изменения частоты и интенсивности ультразвукового воздействия достигнутое равновесие нарушается и спустя время устанавливается вновь уже относительно других размеров частиц [3].

Для достижения определенного размера частиц в процессе ультразвуковой обработки разнокомпонентного раствора необходимо правильно подобрать оптимальную частоту и интенсивность воздействия. Это возможно сделать только опытным путем после осуществления ряда экспериментальных исследований.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве исходного материала подлежащего высокоинтенсивному ультразвуковому озвучиванию, были использованы водные растворы приготовленные на основе бентонитового глинопорошка марки ПБМБ производства предприятия «Хакасский бентонит» концентрацией основного вещества 15 г/л и 25 г/л. Бентонитовый глинопорошок изначально содержит в себе твердые частицы породы размером от 5 мкм. Редко встречаются частицы с размером до 200 мкм.

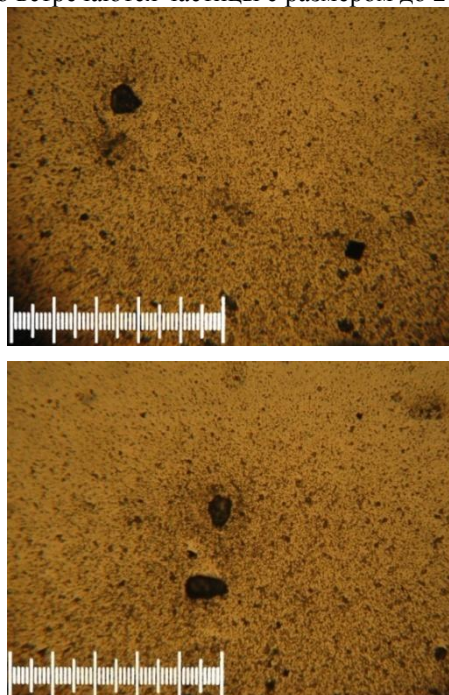


Рисунок 3 – Фотографии частиц содержащихся в исходном бентонитовом глинопорошке (увеличение 100 раз)

В качестве прибора для ультразвуковой обработки жидких сред был выбран аппарат «Волна-М», разработанный в Лаборатории акустических приборов и аппаратов Бийского технологического института [5].



Рисунок 4 – Ультразвуковой технологический аппарат для обработки жидких сред «Волна-М»

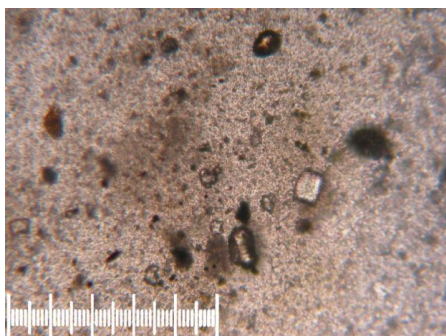


Рисунок 5 – Фотография образца исследуемого раствора без УЗ воздействия после отстаивания (концентрация бентонита 15 г/л, увеличение 100 раз)

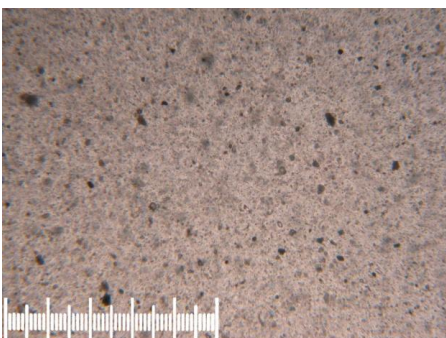


Рисунок 6 – Фотография образца исследуемого раствора с 5 минутами УЗ воздействия после отстаивания (концентрация бентонита 15 г/л, увеличение 100 раз)

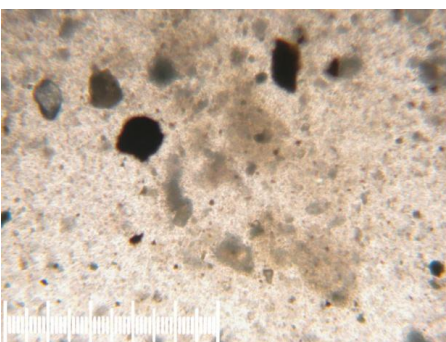


Рисунок 7 – Фотография образца исследуемого раствора без УЗ воздействия после отстаивания (концентрация бентонита 25 г/л, увеличение 100 раз)

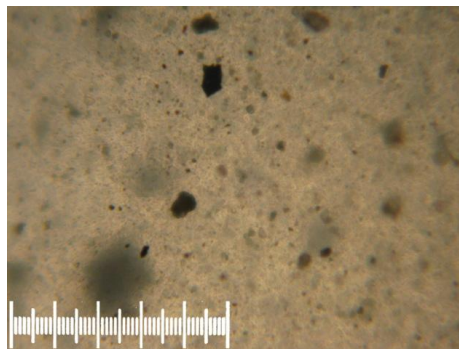


Рисунок 8 – Фотография образца исследуемого раствора с 5 минутами УЗ воздействия после отстаивания (концентрация бентонита 25 г/л, увеличение 100 раз)

Анализируя полученные фотографии исследуемых растворов, следует отметить, что образцы, прошедшие ультразвуковую обработку более однородны, а размер частиц, содержащихся в отобранных образцах значительно меньше, чем в случае отсутствия ультразвуковой обработки (не более 30 мкм при концентрации бентонита 15 г/л и не более 50 мкм – при концентрации 25 г/л).

Визуальная оценка осадка позволяет сделать выводы, что в отсутствие ультразвукового воздействия количество осажденных частиц твердых примесей на дне сосуда минимально, что говорит об их неспособности к осаждению. На дне емкостей с раствором озвученным ультразвуком практически нет вязкого глинистого остатка и присутствует большое количество осажденных твердых частиц загрязняющих примесей, что позволяет утверждать о том, что обработанный и отстаившийся раствор на порядок чище исходного.

Ниже приведена фотография осадка получаемого на дне сосуда после акустической обработки и отстаивания.

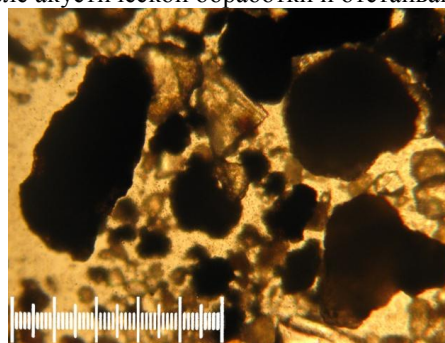


Рисунок 9 – Фотография осадка на дне емкостей с раствором обработанным ультразвуком после отстаивания (увеличение 100 раз)

Получившийся после отстаивания раствора обработанного ультразвуком осадок представляет собой часть примесей, насыщающих исходный раствор. Твердые частицы породы по сравнению с их исходными размерами, стали значительно крупнее (до 500 мкм), что и позволило им выпасть на дно в виде осадка. Кроме того, в ходе экспериментов выяснено, что высокоинтенсивное ультразвуковое озвучивание водного раствора бентонитового глинопорошка позволяет повысить его однородность, дисперсность и тем самым интенсифицировать процесс естественной коагуляции мелких загрязняющих частиц и ускорить их осаждение под действием силы тяжести.

Проведенные эксперименты отразили факт возникновения процесса укрупнения частиц под действием акустических колебаний ультразвуковой частоты. Однако, для того, чтобы

исследовать изменение интенсивности коагуляции в зависимости от мощности и времени озвучивания необходимо было провести ряд дополнительных экспериментов.

В качестве объекта исследований вновь послужил водный раствор бентонитового порошка (содержание бентонита 25 г/л). В ходе исследований производили варьирование мощности ультразвукового воздействия от 25% до 100% с шагом 25% и времени воздействия от 1 минуты до 5 минут с шагом 1 минута. Таким образом, было проведено 20 экспериментов по озвучиванию растворов с одинаковой концентрацией бентонита. После озвучивания раствор отстаивался в течение 1 часа, затем отбиралась проба объемом 250 мл и осуществлялись фильтрование и взвешивание фильтрата. Для сравнения было произведено фильтрование пробы из неозвученного бентонитового раствора и ее взвешивание. Результаты экспериментов представлены в таблице I и на рисунках 10 и 11.

ТАБЛИЦА I

ДАННЫЕ О СОДЕРЖАНИИ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТЬЮ УЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ВРЕМЕНЕМ ОБРАБОТКИ

Условия эксперимента	Масса взвешенных частиц, г/л
25% УЗ, 1 минута	18,88
50% УЗ, 1 минута	20,28
75% УЗ, 1 минута	24,16
100% УЗ, 1 минута	18,88
25% УЗ, 2 минуты	15
50% УЗ, 2 минуты	20,4
75% УЗ, 2 минуты	18,24
100% УЗ, 2 минуты	16,32
25% УЗ, 3 минуты	15,8
50% УЗ, 3 минуты	19,36
75% УЗ, 3 минуты	19,48
100% УЗ, 3 минуты	18,56
25% УЗ, 4 минуты	16,8
50% УЗ, 4 минуты	18,12
75% УЗ, 4 минуты	18,36
100% УЗ, 4 минуты	20
25% УЗ, 5 минут	16,92
50% УЗ, 5 минут	19,8
75% УЗ, 5 минут	17,84
100% УЗ, 5 минут	19,8
Без УЗ	20,36

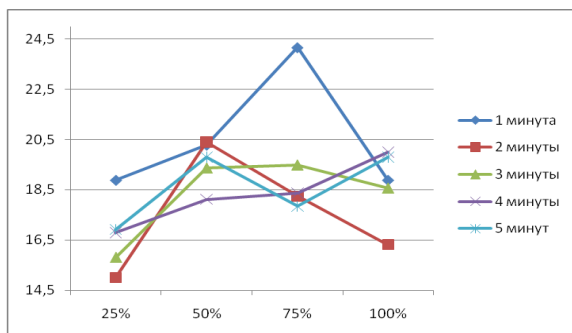


Рисунок 10 – Графики зависимости массы осадка от мощности воздействия при различном времени ультразвуковой обработки

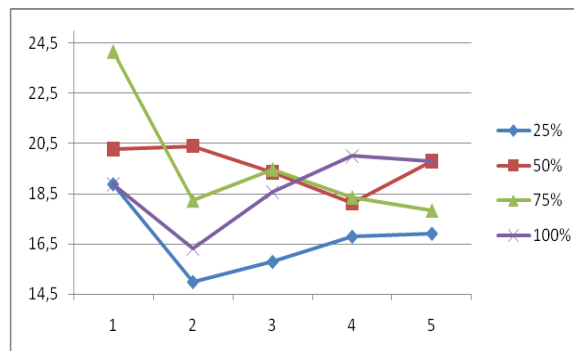


Рисунок 11 – Графики зависимости массы осадка от времени ультразвуковой обработки при различных мощностях воздействия

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первой стадии обработки, при временах воздействия до 1 минуты идет эффективное диспергирование частиц в малом экспериментальном объеме, что препятствует процессам коагуляции и осаждения. Об этом свидетельствует достижение массы растворенных веществ в 24,16 г/л при 75% мощности. Очевидно, что увеличение мощности приводит к ускорению процесса диспергирования.

Для реализации процесса интенсивной коагуляции в малом технологическом объеме достаточно 25% мощности излучения и времени воздействия порядка 2 минут (15 г/л). При увеличении времени воздействия наблюдается небольшое ухудшение процесса коагуляции, что свидетельствует о том, что на малой мощности процесс идет эффективно, но малость объема и большая величина интенсивности излучения в нем ведут к постепенному кавитационному разрушению укрупнившихся частиц. Объем для проведения исследований был выбран минимальным. При увеличении обрабатываемого объема кавитационное разрушение будет ограничено прилегающей к излучателю зоной, а во всем объеме эффективность коагуляции возрастет.

При практической реализации процесса коагуляции в больших объемах эффект должен проявляться сильнее. Оптимальное время воздействия для объемов в 50...100 л не должно превышать нескольких минут. Дальнейшее увеличение обрабатываемых объемов будет требовать увеличения времени обработки.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили эффективность применения интенсивной ультразвуковой обработки для ускорения процессов укрупнения и осаждения твердых частиц в дисперсных жидких средах.

Целесообразным является внедрение высокотехнологичного современного ультразвукового оборудования отечественного производства в уже имеющиеся технологические процессы очистки жидких дисперсных сред от примесей, а также проектирование и разработка совершенно новых высокоэффективных установок для очистки буровых растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Landau L.D., Lifshits E.M. Hydrodynamics. – М.: Science, 1986. (in Russian).
- [2] Boriskina I.P., Martinov S.I. Hydrodynamics interaction influence on the motion of particles in theoretical liquid. – Work of SVMO, 2003 (in Russian).
- [3] Rozenberg L.D., Physical basis of ultrasonic technology. – М.: Science, 1970 (in Russian).
- [4] Bulatov A.I., Washing and tamping solutions of the drilling / Ed. By Bulatov A.I., Makarenko P.P., Proselkov Y.M. – М.: “Nedra”, 1999. – 424 p. (in Russian).
- [5] http://u-sonic.ru/devices/volna_m2