Общество с ограниченной ответственностью
«Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ»

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Центр
ультразвуковых технологий
АлтГТУ»
_____ М.В. Хмелёв
«_21_» _ноября_ 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ О РАБОТЕ

по теме **«Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового диспергирования различных веществ»**

по договору № 2017/09-05
от «11» сентября 2017 г.

Научный руководитель НИР,
д.т.н. профессор
В.Н. Хмелёв

Бийск – 2017

Список исполнителей

Научный руководитель, д.т.н., профессор	21.11.17 подпись, дата	Хмелёв В.Н.

Исполнители темы:

Начальник лаборатории акустических процессов и аппаратов, к.т.н., доцент (ответственный исполнитель)	21.11.17 подпись, дата	Цыганок С.Н.
Инженер-исследователь, к.т.н.	21.11.17 подпись, дата	Голых Р.Н.
Инженер-конструктор, к.т.н.	21.11.17 подпись, дата	Кузовников Ю.М.
Инженер-исследователь, к.т.н.	21.11.17 подпись, дата	Абраменко Д.С.
Инженер-исследователь	21.11.17 подпись, дата	Шакура В.А.

РЕФЕРАТ

Отчет 50 с., 1 ч., 23 рис., 5 табл., 9 источников.

УЛЬТРАЗВУК, ДИСПЕРГИРОВАНИЕ, КАВИТАЦИЯ, БУРЫЙ УГОЛЬ, ТОРФ, НАНОЧАСТИЦА

Цель работы – определение возможности повышения эффективности ультразвукового диспергирования материалов за счет применения высокоинтенсивного кавитационного воздействия, создание стенда для проведения экспериментальных исследований, получение и анализ экспериментальных результатов с выдачей рекомендаций по промышленному применению.

В результате выполнения работы разработана и изготовлена экспериментальная установка (стенд) для исследования эффективности ультразвукового диспергирования органических материалов на примере бурого угля и торфа и неорганических веществ на примере порошков флюоресцента и оксида алюминия.

Экспериментально показано, что кавитационное воздействие с интенсивностью не менее 6 Вт/см^2 позволяет уменьшить размер частиц в течение 4 часов до 40 раз; а длительное УЗ диспергирование (более 4 часов, но не более 24 часов) позволяет получать суспензии с частицами нанометрового диапазона.

На основании полученных экспериментальных данных предложен макет опытного образца промышленного ультразвукового диспергатора.

СОДЕРЖАНИЕ

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ.....8

1.1. Выявление режимов воздействия.....8

1.2. Выявление условий воздействия.....17

2 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРАКТИЧЕСКОЙ РАЛИЗАЦИИ ПАТЕНТА № 2536499.....20

3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ органических веществ.....23

3.1 Вспомогательное, измерительное оборудование. Методика измерений.....23

3.2 Ультразвуковое оборудование.....26

3.3 Полученные результаты.....27

3.4 Проблемы и недостатки традиционных вариантов ультразвукового диспергирования.....29

4 АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К ПРОМЫШЛЕННЫМ.....32

4.1 Описание экспериментальной установки.....32

4.2 План проведения и результаты экспериментов.....34

4.3 Выводы.....38

5 УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ.....40

6 ПРОЕКТ ПРОМЫШЛЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГАТОРА.....46

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....48

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....49

ВВЕДЕНИЕ

Весьма эффективным является УЗ (ультразвуковой) способ получение материала высокой дисперсности. Механизм диспергирования заключается в следующем: разрушение твердых тел при воздействии ультразвука определяется в основном процессом кавитации и акустическими микропотоками. Кавитационный пузырек концентрируется на «слабых» местах частицы – на микротрещинах и на неровностях поверхности, неизбежно существующих, так как диспергируемое вещество, как правило, первоначально находится в порошкообразном состоянии, подвергаясь механическому измельчению. Микроударное действие кавитации на этой стадии наиболее эффективно. На первой стадии, под действием интенсивных микропотоков, образующихся при пульсациях кавитационных пузырьков, поры, углубления и микротрещины на поверхности частицы заполняются жидкостью. На второй стадии происходит раскалывание частиц под действием ударных волн, возникающих в жидкости при захлопывании кавитационных пузырьков [1, 2]. Одновременно протекает процесс окатывания частиц и скалывания острых кромок за счет взаимного трения и соударения частиц одной о другую. Постепенно микронеровности на поверхности частиц сглаживаются, и частицы приобретают сферообразную форму. Данная форма частиц приводит к повышению их сопротивления кавитационному разрушению, и скорость процесса диспергирования уменьшается. В этих условиях выгодно искусственно создавать трещины и неровности на поверхности частиц с тем, чтобы процесс ультразвукового диспергирования протекал эффективно.

Использование повышенного статического давления в определенном соотношении со звуковым давлением позволяет увеличить интенсивность ударных волн при захлопывании кавитационных полостей, а также значительно увеличить эффективность ультразвукового диспергирования.

По этому методу, после 30 мин УЗ диспергирования суспензию подвергают в течение 30 мин механическому измельчению на коллоидной и вибрационной мельнице. При механическом измельчении средние частицы изменяются незначительно, но в частицах возникают микротрещины. После этого суспензию в течение 30 мин вновь подвергают УЗ обработке.

В результате исследований установлено, что при обычном ультразвуковом измельчении, например, размеры частиц гипса уменьшаются за 90 мин от 140 до 20 мкм, а при комбинированном методе за это же время частицы измельчаются от 140 до 4 мкм.

Время УЗ диспергирования по сравнению с механическим при достижении размера частиц от 8 до 10 мкм уменьшилось с 70 до 20 мин.

Изучению влияния режимов ультразвукового воздействия на процесс диспергирования посвящена работа [3]. В ней исследуется диспергирование бентонита в дистиллированной воде под воздействием УЗ кавитации с исходными частицами 200-300 мкм до субмикронных размеров с целью применения в винодельческой промышленности для интенсификации процесса адсорбции пектиновых веществ и их флокуляции (для осветления вина и удаления избытка белков). Соотношение твердой и жидкой фаз 1:20.

Наиболее существенное влияние на диспергирование бентонита оказывает время УЗ воздействия. Увеличение времени воздействия УЗ кавитации сопровождается интенсивным уменьшением размеров частиц, причем наблюдается тенденция к достижению постоянной тонкой дисперсии частиц при обработке более нескольких десятков минут. Степень влияния времени воздействия зависит от амплитуды колебания и проявляется тем сильнее, чем она больше.

Из литературных источников следует, что гомогенная суспензия с частицами размерами 0,4−2,1 мкм получается при амплитудах выше 20 мкм, времени УЗ обработки более 16 мин. и звуковом давлении около 2 Вт/см^2. Предварительная УЗ обработка бентонита, обеспечивая существенное увеличение поверхности частиц, приводит к существенному сокращению

исходной массы бентонита, необходимой для реализации процессов (например, осветления).

Никитиным Ю. Н. и Журавлевой А. В. в работе [4] исследовался процесс ультразвукового диспергирования отходов, образующихся при получении медного электролитического порошка марки ПМС-В (размер частиц более 100 мкм). Процесс ультразвукового диспергирования порошка выполняется с применением повышенного гидростатического давления (0,2 МПа) в рабочей камере на установке генераторного типа УЗВД-6 [4] с использованием УЗ преобразователей с поршневым излучателем, который непосредственно соединен с диафрагмой ненастроенного типа и имеет неравномерное поле излучения. Параметры акустического поля: частота 20 кГц, амплитуда смещения излучателя 2 мкм. Анализ гранулометрического состава порошков показал, что в течение 20 минут УЗ обработки процентное содержание фракций с размером частиц менее 100 мкм диспергированного порошка увеличилось в среднем на 40%.

Цель работы – определение возможности повышения эффективности ультразвукового диспергирования органических, выявление оптимальных условий и режимов материалов за счет применения высокоинтенсивного кавитационного воздействия на примере бурого угля и торфа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

1) провести теоретический анализ кавитационного воздействия, обеспечивающего диспергирование частиц суспензии до размеров менее 1 мкм;

2) разработать стенд и экспериментально исследовать эффективность ультразвукового диспергирования;

3) разработать технологическую схему опытного образца промышленного ультразвукового диспергатора.

Решение поставленных задач представлено в следующих разделах.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Для выявления оптимальных режимов и условий ультразвукового кавитационного воздействия, обеспечивающих диспергирование частиц на примере угольной суспензии до размеров менее 1 мкм, необходимо провести предварительный теоретический анализ данного процесса.

Созданные теоретические описания, позволившие выявить режимы (частота и интенсивность колебаний) и условия (геометрия излучателя и технологического объёма) воздействия, представлены далее.

1.1. Выявление режимов воздействия

В работах [5, 6] при определении **частоты колебаний**, обеспечивающей формирование кавитационной области с максимальной энергетической эффективностью для реализации ультразвукового диспергирования (режим развитой кавитации), было установлено, что повышение частоты f приводит к уменьшению максимального радиуса R_{MAX} кавитационной полости при постоянном значении интенсивности колебаний. Такой результат обусловлен тем, что с ростом f сокращается время, в течение которого величина звукового давления превышает внешние силы, удерживающие пузырёк в состоянии равновесия, когда он может неограниченно расширяться за счёт содержащегося в нём газа.

Уменьшение R_{MAX} кавитационных полостей с ростом f способствует росту давления парогазовой смеси в пузырьке к началу захлопывания, что увеличивает совокупную энергию кавитационных ударных волн.

Сводные данные о влиянии частоты УЗ воздействия на динамику кавитационной полости приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Влияние частоты колебаний на основные характеристики формируемых кавитационных пузырьков

Частота, кГц	Максимальный радиус пузырька, мкм	Минимальный радиус пузырька, мкм	Время расширения полости, мкс	Максимальное давление внутри пузырька при схлопывании, ГПа
20	582	9,65	36	29
40	292	4,95	18	29,6
100	117,6	2,08	7,3	22,3
500	24,9	0,82	1,47	21,4

С другой стороны, при повышении частоты УЗ колебаний возникающие акустические потоки становятся меньшими по масштабу [6], что приводит к возрастанию равномерности ультразвуковой кавитационной обработки гетерогенных сред с жидкой фазой. Кроме того, снижение максимальных размеров кавитационных пузырьков (см. таблицу 1.1) с ростом частоты уменьшает эффект экранировки на границе излучатель–обрабатываемая среда, где кавитация развита в наибольшей степени, и способствует более равномерному распределению пузырьков в объёме среды.

Однако из представленной таблицы следует, что, начиная примерно с 40 кГц, происходит значительное снижение максимального давления внутри пузырька при схлопывании. При этом растёт порог кавитации, что в целом, всё-таки, приводит к снижению эффективности ультразвукового кавитационного воздействия.

Обобщая сказанное о влиянии частоты следует сделать выводы о том, что повышение частоты выше 20 кГц нецелесообразно из-за снижения эффективности воздействия, а снижение частоты воздействия ниже 20 кГц (нормативно-технической документацией разрешено использовать УЗ воздействия с частотой не ниже 15 кГц), приводит к тому, что инерциальные члены уравнения динамики кавитационного пузырька будут расти столь

медленно, что он начнёт вырождаться в пульсирующий. Кавитационные пузырьки перестанут взрываться и диспергирующее воздействие УЗ колебаний при этом прекратится.

Поэтому, оптимальным следует считать УЗ воздействие на частоте порядка 20 кГц и, в дальнейшем, использовать УЗ воздействия на такой частоте для ультразвукового диспергирования углеродосодержащих материалов.

Для определения **интенсивности колебаний** необходимо проанализировать кинетику диспергирования частиц угольной суспензии.

Для анализа кинетики диспергирования частиц принималось допущение о том, что размеры частиц могут принимать фиксированные значения из дискретного набора d_1, d_2, … d_k, d_{k+1},… [7].

В зависимости от натурального числа k дискретный размер определяется согласно следующему выражению:

$$d_k=d_0/2(k–1)/3;$$

где d_0 – размер наибольшей частицы, м.

При этом частицы, имеющие одинаковый размер d_k, образуют k-ю группу.

Анализ кинетики диспергирования частиц проводился на основе вероятностного подхода [7], позволяющего рассчитать эволюцию концентраций частиц n_k из каждой k-й группы с течением времени. Скорость изменения концентраций частиц каждого размера пропорциональна вероятности разрушения отдельной частицы. Для определения вероятности распада предполагалось, что частица распадается тогда и только тогда, когда кавитационный пузырёк схлопывается внутри некоторой окрестности, окружающей частицу, именуемой «окрестностью распада» (рисунок 1.1) [7].

При схлопывании пузырька в «окрестности распада» излучаемая ударная волна, достигнув поверхности частицы, сохраняет амплитуду давления, превышающую предел прочности материала частицы. Следовательно, частица разрушается, т.е. диспергируется.

При схлопывании пузырька за пределами «окрестности распада» ударная волна при достижении поверхности частицы оказывается сильно рассеянной, и амплитуда волны становится недостаточной для разрушения частицы.

Указанное предположение справедливо ввиду того, что ударная волна, генерируемая кавитационным пузырьком, затухает обратно пропорционально расстоянию от его центра [7]. Соответственно, вероятность зарождения и схлопывания пузырька в «окрестности распада» и определяет вероятность разрушения (диспергирования частицы).

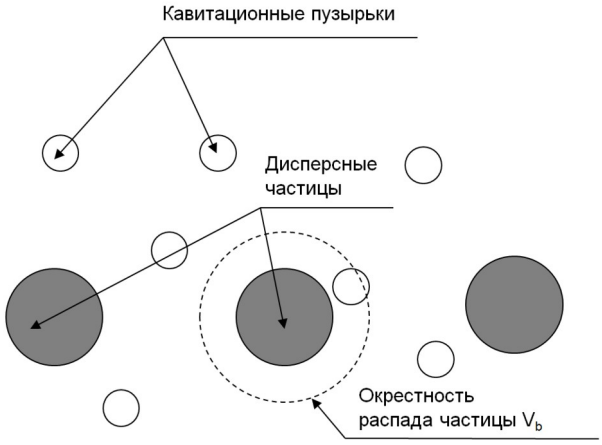


Рисунок 1.1 – Вероятностная модель распада частиц под действием кавитации

На основе указанных предположений было получено уравнение кинетики диспергирования частиц – дифференциальное уравнение относительно концентраций частиц каждой группы как функций времени $n^{k}(t)$ [7]:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = f n_{bub}\left(2V_{b(k+1)}n_{k+1} - V_{bk}n_k\right); \qquad (1.1)$$

где f – частота УЗ колебаний, Гц; n^{bub} – концентрация кавитационных пузырьков, м$^{-3}$; V^{bk} – объём окрестности распада вокруг частицы размером d^{k}, м^{3}.

Входящая в уравнение (1.1) концентрация кавитационных пузырьков определяется согласно выражению (1.2) в соответствии с ранее разработанной моделью формирования кавитационной области [5, 8]:

$$n_{\infty} = \frac{2(j-1)}{25\pi {R_{MAX}}^2 i \left|\mathbf{d}_{12}(T) - \mathbf{d}_{12}(0)\right|}; \qquad (1.2)$$

где i – среднее число пульсаций кавитационного пузырька до его расщепления; T – период ультразвуковых колебаний, с; j – среднее число зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька; R_{MAX} – максимальный радиус пузырька, достигаемый в стадии расширения, м; $\mathbf{d}_{12}$ – вектор линии центров взаимодействующих кавитационных пузырьков, м.

Для определения объёма окрестности распада V_{bk} было выявлено распределение амплитуд давления ударной волны на основании уравнений Кирквуда-Бете и Лапласа для асферического схлопывания пузырька [5, 7] и рассчитывалась минимально необходимая для диспергирования амплитуда давления с помощью линейной теории упругости, позволившей выявить распределение механических напряжений внутри частицы.

Всё это позволило рассчитать максимальное расстояние h от центра кавитационного пузырька, на котором амплитуда давления ударной волны достаточна для разрушения частицы.

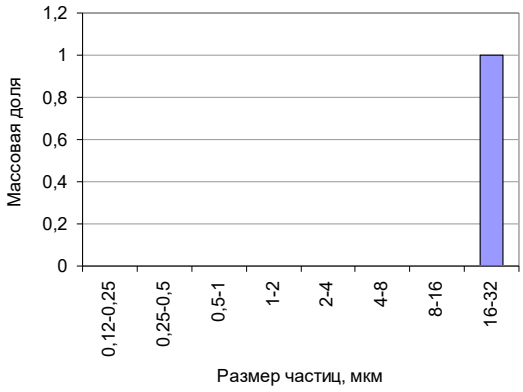
Зная расстояние h, объём окрестности распада определялся согласно следующему выражению (1.3) [7]:

$$V_{bk} = \frac{4}{3}\pi\left[\left(\frac{d_k}{2} + h\right)^2 - \left(\frac{d_k}{2}\right)^2\right]; \qquad (1.3)$$

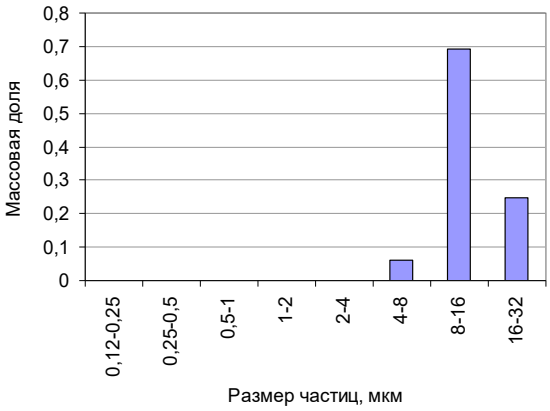
где h – максимальное расстояние от центра кавитационного пузырька, на котором амплитуда давления ударной волны достаточна для разрушения частицы, м.

На основании представленных уравнений получены гистограммы дисперсного состава частиц угля в зависимости от времени и интенсивности ультразвукового воздействия (рисунки 1.2–1.5).

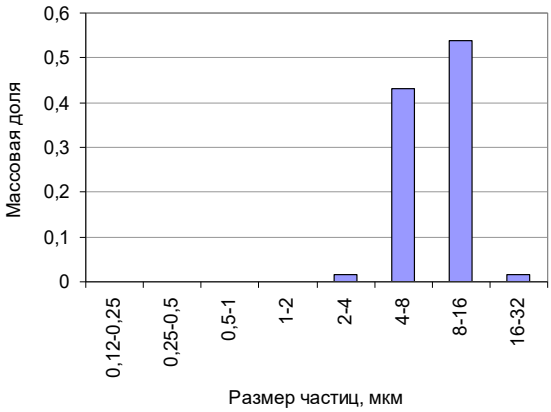
При построении гистограмм общее время диспергирования выбиралось равным 4 часам с целью обеспечения необходимой производительности процесса по массе получаемой суспензии в единицу времени.



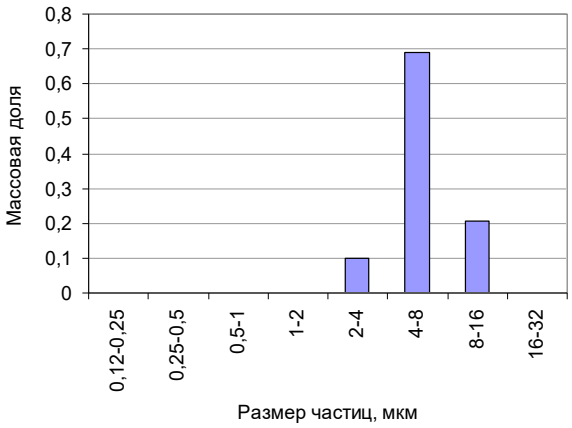
а) 0 часов



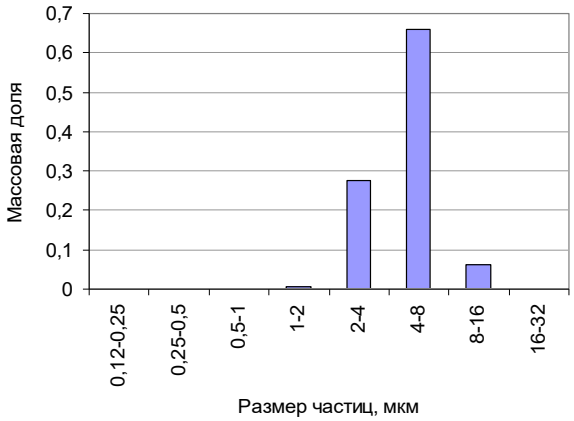
б) 1 час



в) 2 часа

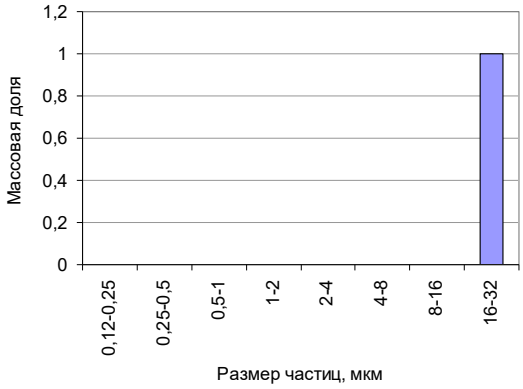


г) 3 часа

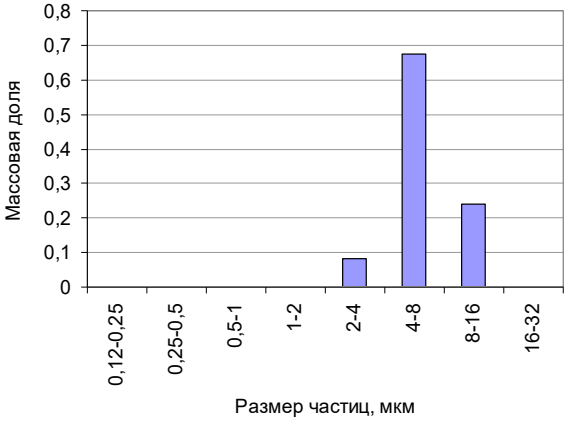


д) 4 часа

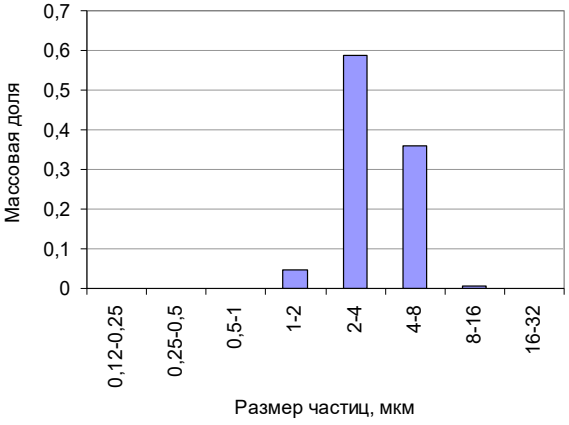
Рисунок 1.2 – Гистограммы дисперсного состава частиц угля в различные моменты времени при интенсивности воздействия 3 $Вт/см^2$



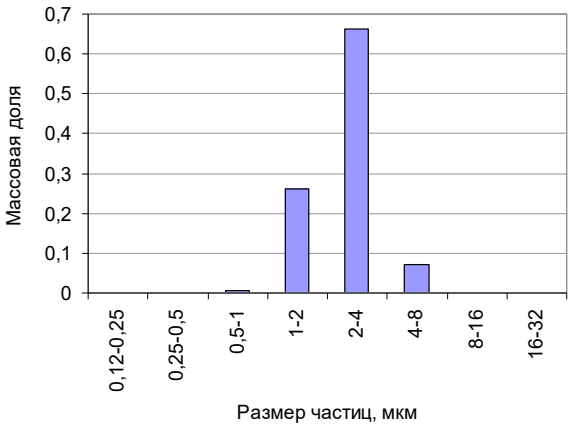
а) 0 часов



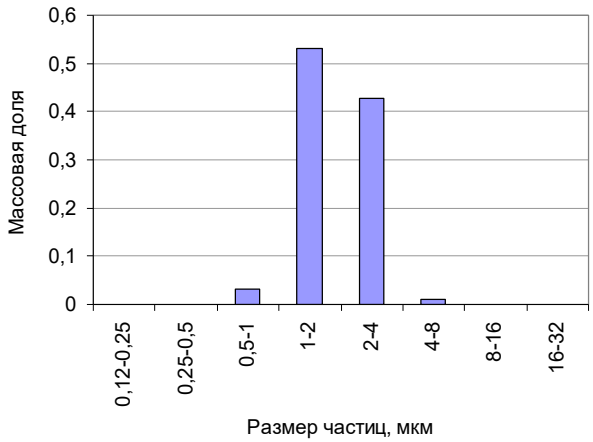
б) 1 час



в) 2 часа

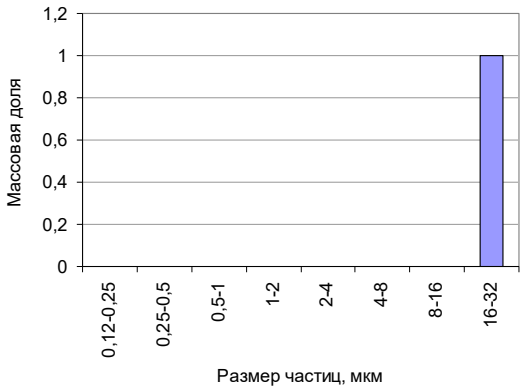


г) 3 часа

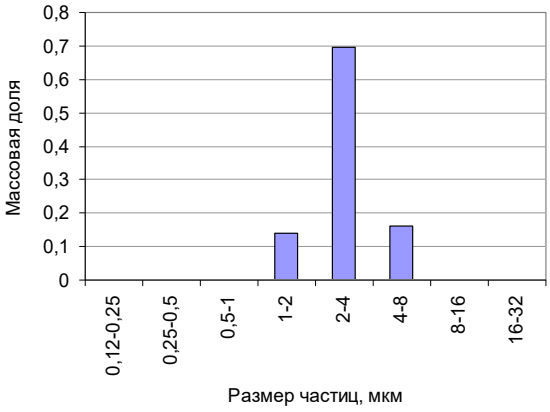


д) 4 часа

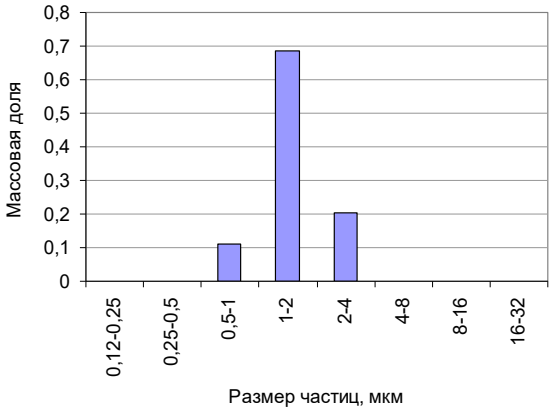
Рисунок 1.3 – Гистограммы дисперсного состава частиц угля в различные моменты времени при интенсивности воздействия 4 Вт/см^2



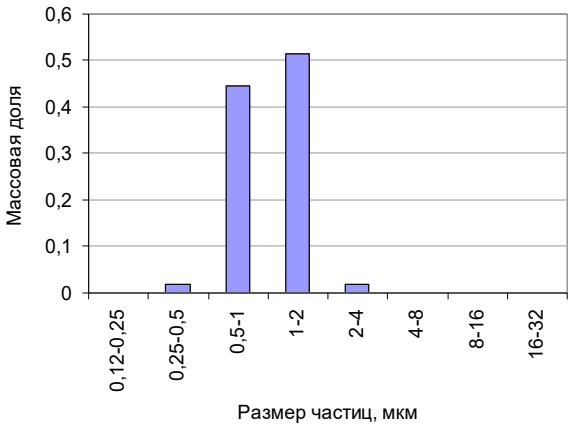
а) 0 часов



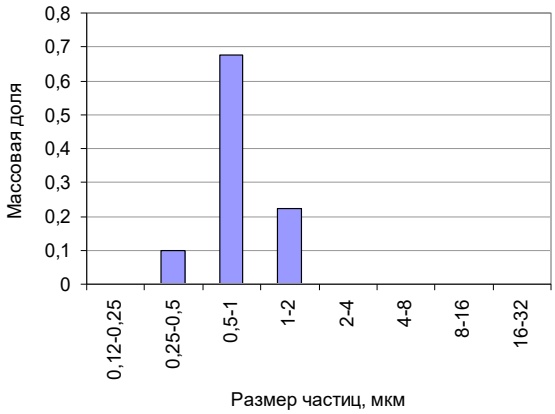
б) 1 час



в) 2 часа

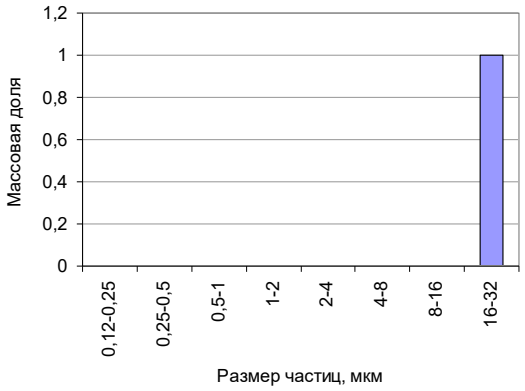


г) 3 часа

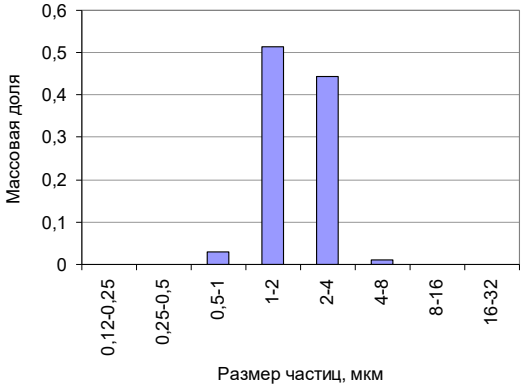


д) 4 часа

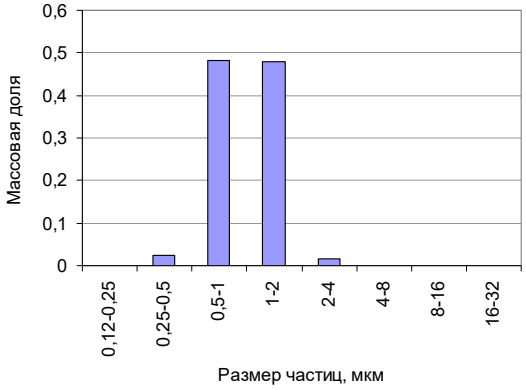
Рисунок 1.4 – Гистограммы дисперсного состава частиц угля в различные моменты времени при интенсивности воздействия 6 Вт/см^2



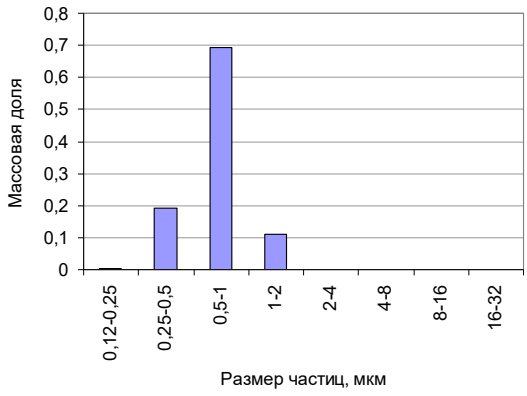
а) 0 часов



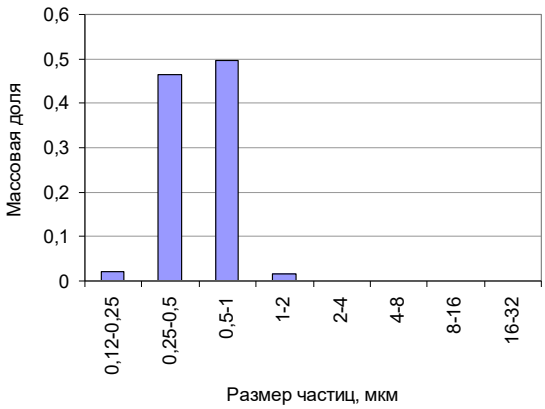
б) 1 час



в) 2 часа



г) 3 часа



д) 4 часа

Рисунок 1.5 – Гистограммы дисперсного состава частиц угля в различные моменты времени при интенсивности воздействия 8 Вт/см^2

Как следует из представленных гистограмм, при интенсивности воздействия 3 Вт/см^2 (минимальная интенсивность, необходимая для возникновения кавитации) наноразмерные частицы даже после 4-х часов диспергирования практически отсутствуют.

При повышении интенсивности до 4 Вт/см^2 наноразмерные частицы начинают присутствовать в заметном количестве. Однако их массовая доля после 4-х часов воздействия не превышает 3 %.

Начиная с интенсивности 6 Вт/см^2, массовая доля наноразмерных частиц (менее 1 мкм) составляет более 70 %. Резкий рост массовой доли частиц связан, по всей видимости, с выходом на режим развитой кавитации [5].

При этом, воздействие с интенсивностью 8 Вт/см^2 приводит к образованию наночастиц размером менее 250 нм.

Таким образом, минимально необходимую интенсивность УЗ воздействия следует считать равной 6 Вт/см^2.

Далее было осуществлено выявление условий воздействия, обеспечивающих интенсивность не менее 6 Вт/см^2 в максимально возможном объёме среды.

1.2. Выявление условий воздействия

Большинство традиционных ультразвуковых аппаратов, производимых на сегодняшний день, реализуют воздействие методом погружения поршневого рабочего инструмента в жидкость.

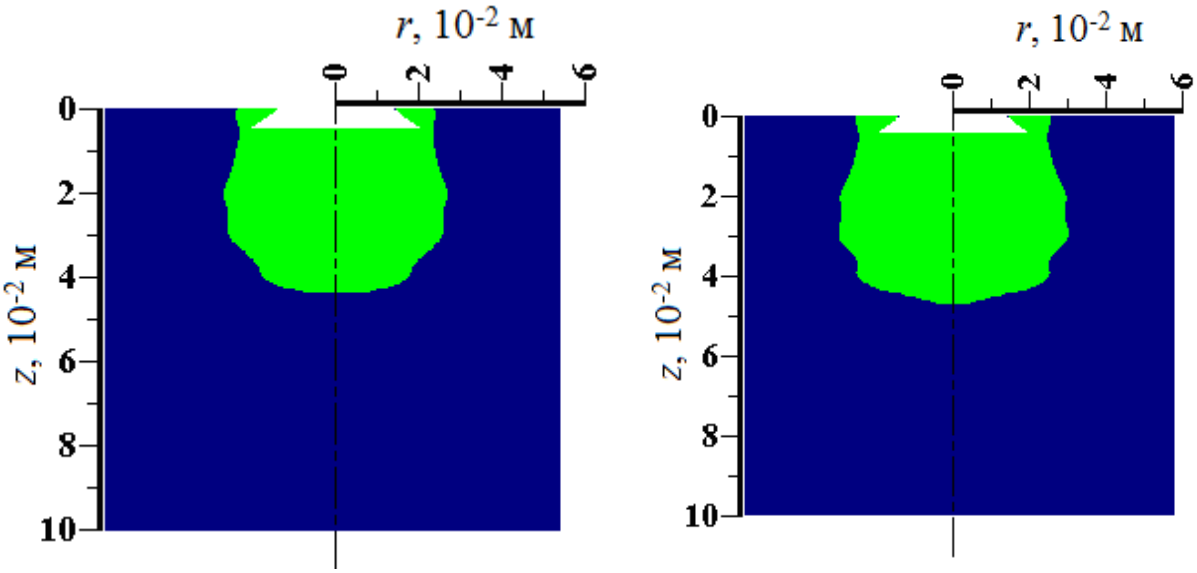
Далее представлены формы и распределения зон эффективного диспергирования (зон, где интенсивность достаточна для образования наночастиц через 4 часа процесса – 6 Вт/см^2) (рисунок 1.6).

Формы и распределения зон получены на основании решения волнового уравнения распространения УЗ колебаний в кавитирующей среде, приведённого в работах [5, 8]:

$$\Delta\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}\right)+\frac{\omega^2}{{c_0}^2}\left(1-\frac{{\rho_0}{c_0}^2\overline{\delta_1}\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}\right)}{\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}}\right)\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}=0\,,$$

(1.4)

где I – интенсивность УЗ колебаний (действительная величина), Вт/м^3,φ – фазовый сдвиг колебаний звукового давления в среде, ω – круговая частота первичного УЗ поля, с$^{-1}$, c_0 – скорость звука в жидкой фазе, м/с, ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, кг/м^3, ρ – плотность кавитирующей жидкости, кг/м^3, c – скорость звука в кавитирующей жидкой фазы, м/с, $\overline{\delta_1}\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})}\right)$ – комплексная амплитуда первой гармоники объёмного содержания кавитационных пузырьков $\delta\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})},t\right)$ как функции от времени t при заданной интенсивности УЗ колебаний I(r), **x** – радиус-вектор точки жидкой фазы, м.



а) 11 Вт/см^2 б) 16 Вт/см^2

Рисунок 1.6 – Распределения зон эффективного диспергирования (обозначены зелёным цветом) при различных интенсивностях УЗ воздействия

Как следует из представленных распределений, доля объёма зоны эффективного диспергирования от общего объёма не превышает 12 % даже при интенсивности воздействия вблизи излучающей поверхности 16 Вт/см^2.

Это связано с высоким поглощением колебаний (более 20 дБ/м) в кавитирующей жидкости [5]. Поэтому необходимо увеличивать объём зоны эффективного диспергирования за счёт увеличения площади излучающей поверхности.

Многократное увеличение площади поверхности обеспечивает многозонный излучатель, представленный на рисунке 1.7. На этом же рисунке приведены распределения зон эффективного диспергирования.

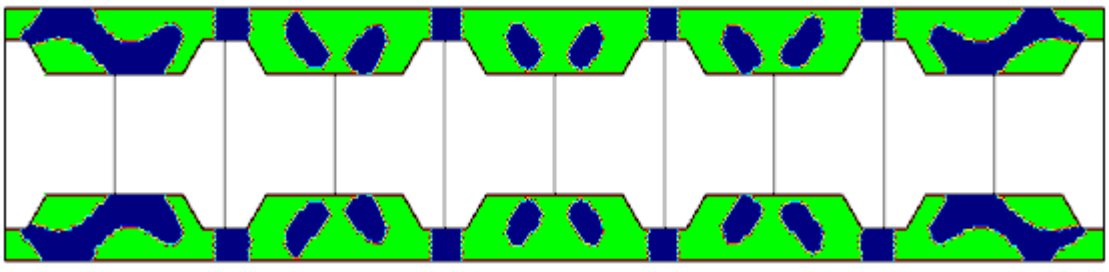


Рисунок 1.7 – Распределение зон эффективного диспергирования (выделено зелёным цветом) в цилиндрическом технологическом объёме с многозонным излучателем

Как следует из представленных распределений. Доля объёма зоны эффективного диспергирования (от полного объёма) достигает более 80%.

Таким образом, для получения угольной суспензии с наноразмерными частицами необходимо воздействовать в цилиндрическом технологическом объёме с помощью многозонного излучателя.

2 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРАКТИЧЕСКОЙ РАЛИЗАЦИИ ПАТЕНТА № 2536499

В анализируемом патенте № 2536499 автора Смородько А.В. указано, что УЗ диспергирование необходимо осуществлять с переменной частотой в диапазоне 15-30 кГц при статическом давлении 5-30 атм. и интенсивности (плотности озвучивания) не менее 50 Вт/см^2.

Анализ существенных отличий, характеризующих формулу изобретения, позволил установить следующее:

Во-первых, УЗ колебательная система всегда является резонансной системой (одна частота воздействия ±300 Гц). Поэтому нельзя от одной УЗ колебательной системы воздействовать в диапазоне от 15 кГц до 30 кГц. Для каждой частоты нужна своя УЗ колебательная система, которая должна устанавливаться в одном технологическом объеме.

Во-вторых, интенсивность 50 Вт/см^2 и более может быть достигнута только при помощи механических концентраторов, т.е. путем уменьшения диаметра излучающей поверхности, что в целом скажется на уменьшении производительности УЗ диспергирования.

Если использовать излучатель в виде цилиндра, то максимальная интенсивность УЗ воздействия у него будет вдоль оси симметрии, а это опять небольшая область.

В-третьих, увеличение избыточного давления в технологической среде повышает порог возникновения кавитации в ней. Необходимым и достаточным условием возникновения схлопывающихся пузырьков в жидкости является создание пониженного давления, меньшего, чем давление насыщенных паров жидкости.

Это означает, что амплитуда звукового давления должна составлять не менее $P_{стат}–P_{нас}$, где $P_{стат}$ – статическое давление, Па; $P_{нас}$ – давление насыщенных паров жидкости.

Минимально необходимая интенсивность колебаний определяется согласно следующему выражению:

$$I = \frac{(P_{стат} - P_{нас})^2}{2\rho c};$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м3; с – скорость звука в жидкости, м/с.

При давлении 30 атмосфер (3 МПа); температуре 300 К (давление насыщенных паров составляет менее 5 кПа); плотности жидкости при н.у. 1000 кг/м^3 (давление 3 МПа изменяет плотность жидкости не более чем на 0,3 % относительно н.у.); скорости звука в жидкости – 1500 м/с минимально необходимая интенсивность составит:

$$I = \frac{(P_{стат} - P_{нас})^2}{2\rho c} = 1200 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Далее можно рассуждать о практическом применении и такой технологии.

Даже если мы сделаем излучатель с рабочей излучающей поверхностью 1 см^2 (рабочее окончание диаметром 11 мм), и будем вводить (гипотетически) энергию УЗ колебаний через такую поверхность с интенсивностью 1200 Вт/см^2, то при КПД преобразования электрической энергии в энергию УЗ колебаний не более 60% необходимо применение УЗ колебательной системы мощностью не менее 2000 Вт и электронного генератора мощностью не менее 2500 Вт.

При этом кавитационной обработке для реализации технологического процесса будет подвергаться объем обрабатываемой жидкости размером не более 1 см^2 х 5 см = 5 см^3. Такой мизерный объем не позволяет рассчитывать на реализацию промышленной технологии.

Если же (гипотетически) решать проблему промышленного применения предлагаемого патента возникает необходимость обрабатывать не менее 1 л (1000 см^3) технологической жидкости. Энергетические затраты на обработку такого объема жидкости составят 500000 Вт.

К сожалению, реализовать на практике УЗ воздействие с указанной

интенсивностью технически невозможно, поскольку рабочее окончание колебательной системы должно совершать механические ультразвуковые колебания с амплитудой более 1000 мкм. В природе не существует реальных (до настоящего времени искусственно не созданы) материалов, способных совершать колебания с такой амплитудой. Из известных на сегодня материалов специальные сплавы титана имеют предел прочности (разрушаются) при амплитудах, не достигающих 300 мкм.

Таким образом, реализовать заявленные в патенте Смородько А.В. эффекты, технически очень сложно и в настоящее время практически невозможно.

3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Прежде чем отрабатывать технологию УЗ диспергировании для промышленного использования необходимо показать эффективность УЗ воздействия.

3.1 Вспомогательное, измерительное оборудование. Методика измерений

В качестве исходных материалов для проведения исследований были взяты:

– бурый уголь с Мунайского угольного разреза Солонешинского района;

– торф, добываемый в окрестностях с пос. Сорокино г. Бийска Алтайского края.

Предварительно бурый уголь был механически измельчен до размера не более 0,5-1 см, а затем перемолот при помощи кофемолки Bosch MKM6003 (рисунок 3.1). Разовая перемалываемая порция составляла 15-20 грамм, время перемалывания 60-70 секунд. После перемалывания происходил отсев крупной фракции при помощи металлического сита с ячейкой 0,3 мм.



Рисунок 3.1 – Кофемолка Bosch MKM6003

Приведенные далее в отчете фотографии были получены при помощи

микроскопа «МИКМЕД-6», приведенного на рисунке 3.2. При 1000-че кратном увеличении, цена деления шкалы составила 10 мкм.



Рисунок 3.2 – Микроскоп МИКМЕД-6

Методика получения фотографий с частицами различных размеров заключалась в следующем. Емкость, из которой бралась проба, тщательно размешивалась. Измеряемая проба бралась сверху (не более 1-2 грамм) и разводилась водой в пропорции 1:10 (не менее). Полученная разведенная проба наносилась на предметное стекло и оставлялась до полного испарения воды. Затем предметное стекло с нанесенной измеряемой пробой устанавливалось на предметный стол микроскопа. Для наблюдения при 1000-м увеличении на предметное стекло наносилась иммерсионная жидкость (вазелиновое масло). Полученные увеличенные изображения фиксировались с помощью цифрового фотоаппарата.

Фотографии измельченного бурого угля (исходное состояние)

приведены на рисунке 3.3

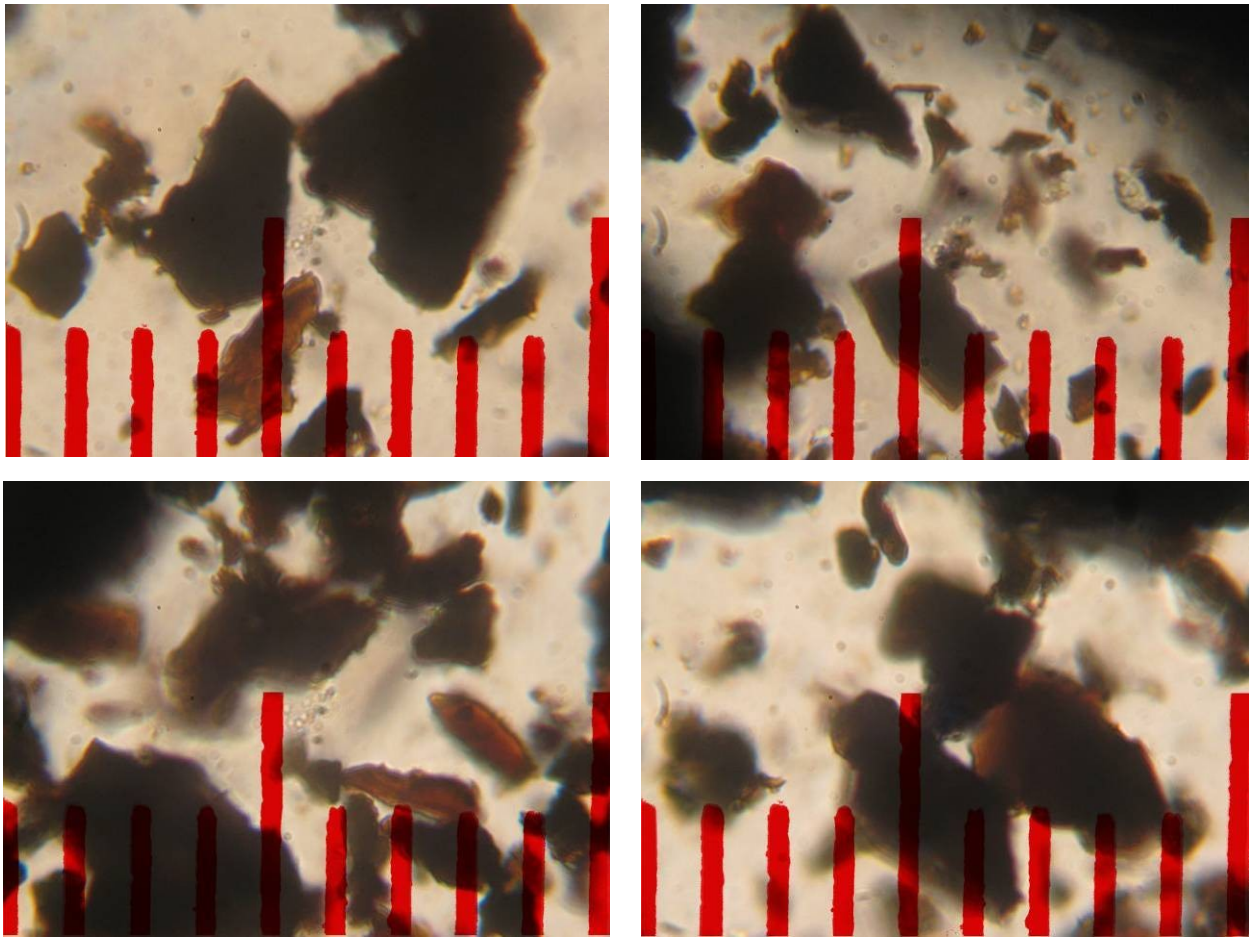
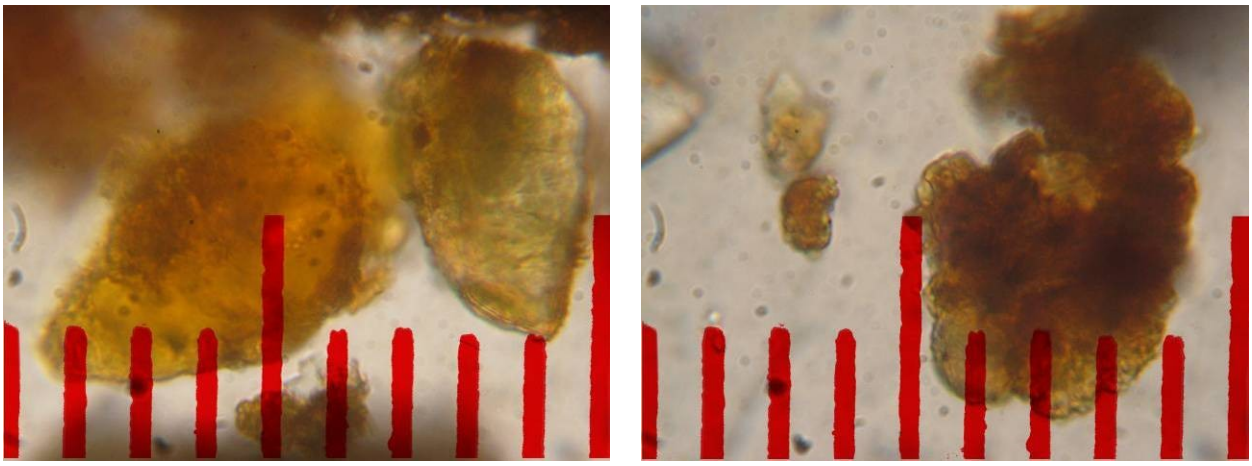


Рисунок 3.3 – Бурый уголь в исходном состоянии

Торф брался в исходном состоянии, не измельчаясь. Фотографии торфа (исходное состояние) приведены на рисунке 3.4



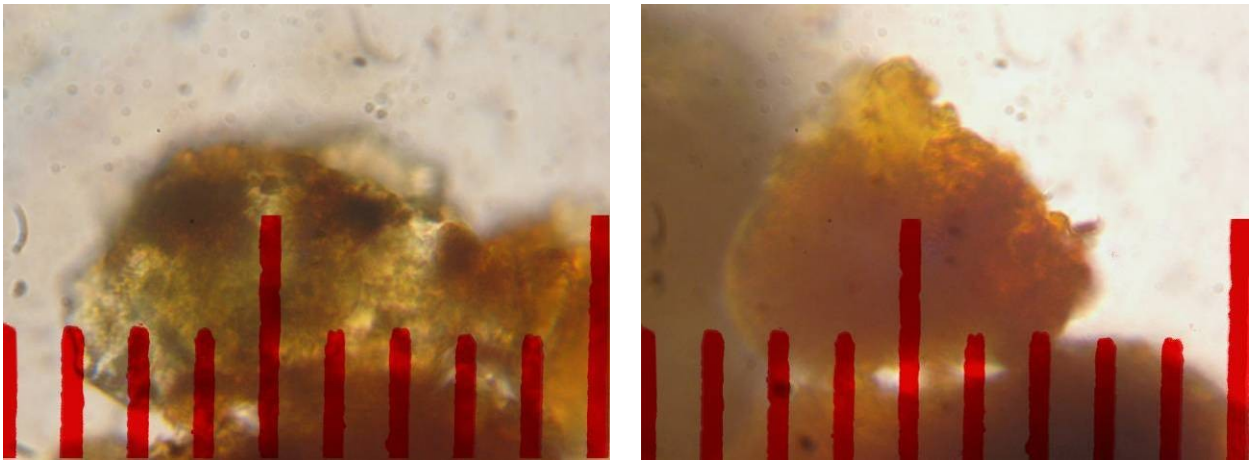


Рисунок 3.4 – Торф в исходном состоянии

Таким образом, исходный средний размер частиц измельченного бурого угля был принят равным 30-40 мкм, а торфа – 70-80 мкм.

3.2 Ультразвуковое оборудование

Предварительные результаты УЗ диспергирования были получены при помощи УЗ технологического аппарата «Волна-М» модель УЗТА-1/22-ОМ, приведенного на рисунке 3.5. Основные его технические характеристики указаны в таблице 3.1.



Рисунок 3.5 – Ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М» модель УЗТА-1/22-ОМ

Таблица 3.1 – Технические характеристики

п/п	Наименование	Значение
1	Мощность, ВА, не более	1000
2	Частота УЗ воздействия, кГц	22±1,65
3	Питание от сети переменного напряжения, В	220±22
4	Интенсивность излучения, Вт/см^2, не менее	15
5	Диаметр рабочего инструмента, мм	40

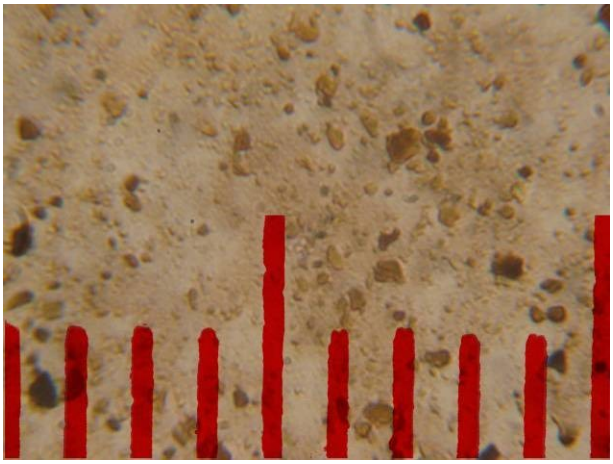
3.3 Полученные результаты

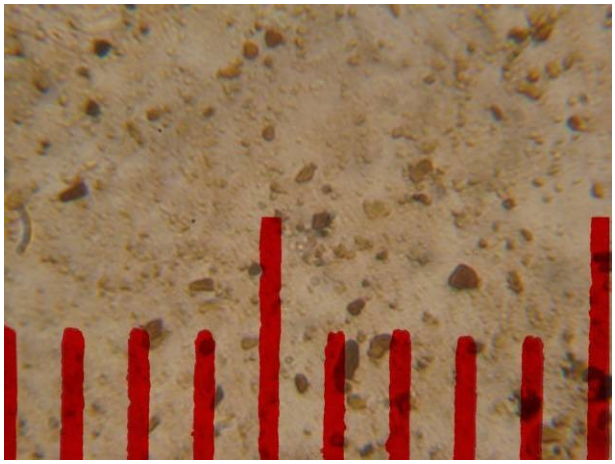
УЗ диспергирование длительный по времени процесс – измельчение происходит в течение нескольких часов.

Для компенсации нагрева обрабатываемой технологической среды – водно-дисперсной суспензии – вследствие поглощения акустической энергии технологический объем был заключен в водяную рубашку. Это позволило поддерживать температуру обрабатываемой технологической среды в диапазоне 40-60 ºС в ходе всего эксперимента.

Соотношение сырье: жидкая фаза было взято 1:10 (90 грамм сырья и 900 грамм воды). Время воздействия составило 24 часа. Избыточное давление в обрабатываемой технологической среде не создавалось.

Результаты представлены на рисунках 3.6 (бурый уголь) и 3.7 (торф).





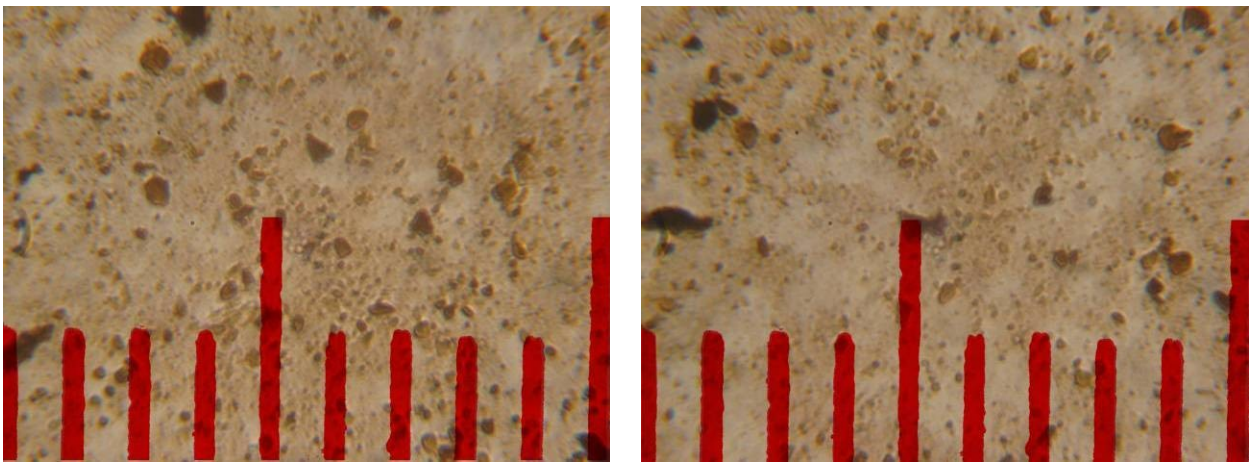


Рисунок 3.6 – Бурый уголь после 24 часов

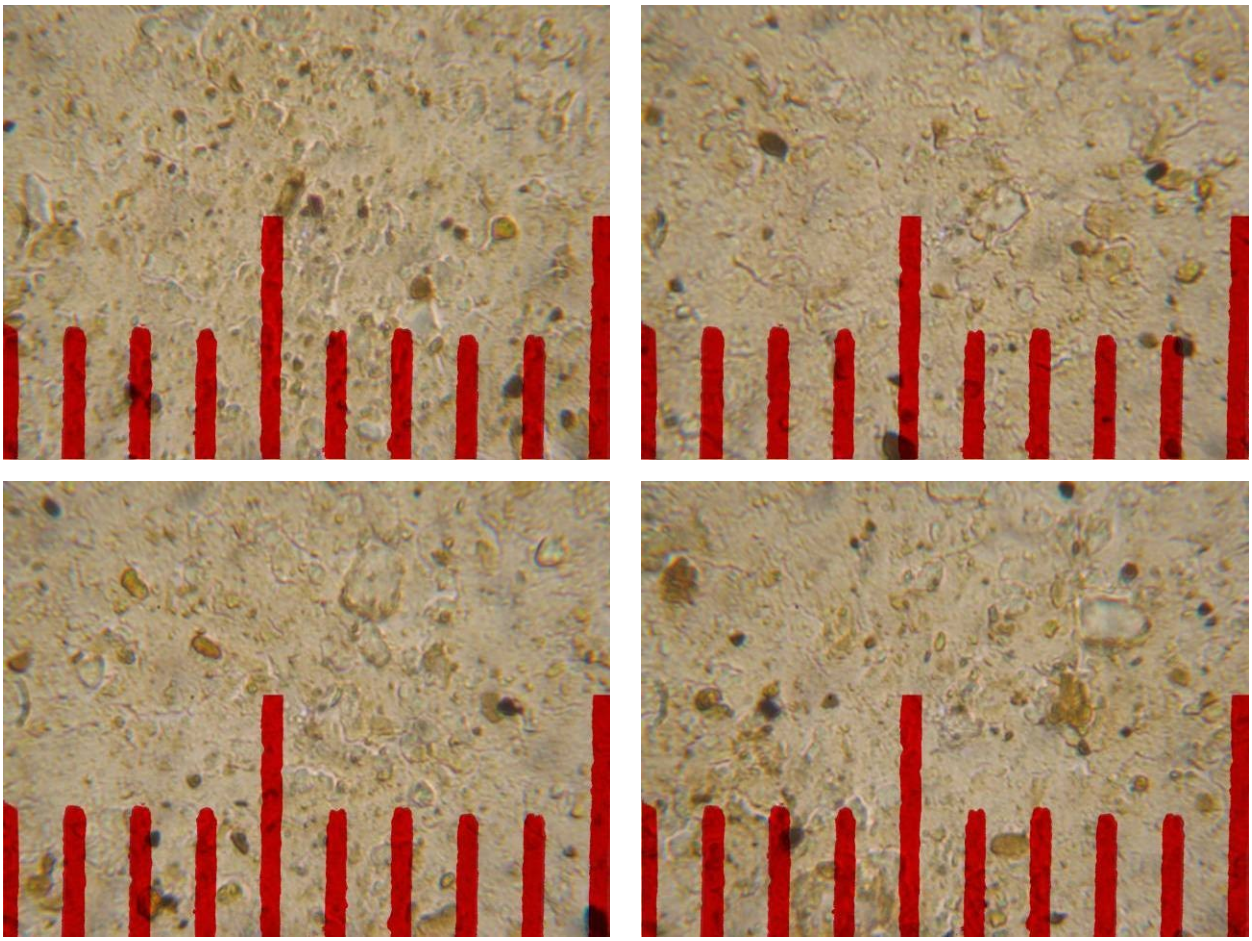


Рисунок 3.7 – Торф после 24 часов

Средний размер частиц полученного диспергированного бурого угля составил менее 2 мкм – полное осаждение полученной суспензии происходило в течение 8-10 часов.

Средний размер частиц полученного диспергированного торфа составил менее 1 мкм. Наблюдаемые на рисунке 3.7 крупные пятна представляю собой агломераты высохших частиц. Причем осаждение полученной суспензии не происходило в течение 7 суток, что косвенно свидетельствует о том, что был получен коллоидный раствор – размер частиц от 1 нм до 100 нм.

Торф разрушается быстрее, чем бурый уголь.

Таким образом, в результате предварительных исследований было подтверждено, что УЗ кавитационное воздействие способствует разрушению твердых частиц в суспензиях, причем получение наночастиц достижимо.

3.4 Проблемы и недостатки традиционных вариантов ультразвукового диспергирования

Как было отмечено в п.1.2 более эффективное диспергирование должно происходить в цилиндрических объемах с использованием многозонных или многополуволновых излучателей.

В таблицах 3.2 и 3.3. представлены основные технические и энергетические параметры ультразвукового технологического оборудования, выпускаемого ООО «Центр ультразвуковых технологий» [9] и предназначенного для кавитационного воздействия на дисперсные системы с преимущественно жидкой фазой. Т.е. такое оборудование может применяться для диспергирования бурого угля и торфа.

Таблица 3.2 – Технические параметры

	Аппарат	Площадь излучения, $см^2$	Интенсивность, $Вт/см^2$	Активная потребляемая мощность, Вт	Максимальная полная потребляемая мощность, ВА
1	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП	20,2	16,2±0,7	575±25	1000
2	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП (вариант исполнения №2)	25,2	13,0±0,6	575±25	1000
3	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-2/18-ОП	63,0	9,2±0,5	825±25	2000
4	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-3/22-ОП (конструктивные варианты исполнения №1 и №2)	145,2	5,1±0,2	1050±50	3000
5	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОП, УЗАП-8/22-ОПГ (конструктивные варианты исполнения №1-№3)	302,2	7,3±0,4	3150±150	8000
6	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-10/18-ОПГ	432,3	6,0±0,5	3700±400	10000

Таблица 3.3 – Энергетические параметры

	Аппарат	Разовый обрабатываемый объем, $см^3$	Средняя объемная интенсивность, $Вт/см^3$
1	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП	1,25	262,2±11,4
2	«ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП (вариант исполнения №2)	1,5	218,2±9,5
3	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-2/18-ОП	2,25	256,7±7,8
4	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-3/22-ОП (конструктивные варианты исполнения №1 и №2)	2,7	272,2±13,0
5	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОП, УЗАП-8/22-ОПГ (конструктивные варианты исполнения №1-№3)	8,0	275,6±13,1
6	«БУЛАВА-П» модель УЗАП-10/18-ОПГ	10	259,0±21,0

В п. 1.1 было указано, что минимально необходимую интенсивность УЗ воздействия следует считать равной 6 Вт/см^2.

Анализ приведенных в таблицах 3.2 и 3.3 технических характеристик показывает, что этому требованию удовлетворяют практически все УЗ аппараты. В частности, интерес представляют лабораторный УЗ технологический аппарата «ВОЛНА-П» модель УЗАП-1/22-ОП (вариант исполнения №2) и промышленный УЗ технологический аппарат БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОП, УЗАП-8/22-ОПГ (конструктивные варианты исполнения №1-№3). Экспериментальные результаты, полученные на первом, лабораторном аппарате, могут быть перенесены на второй, промышленный аппарат, с целью их дальнейшего внедрения в производство.

4 АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К ПРОМЫШЛЕННЫМ

Задачей последующих серий измерительных опытов являлось выявление режимов УЗ диспергирования бурого угля и торфа в условиях, максимально приближенных к промышленным.

4.1 Описание экспериментальной установки

УЗ оборудование экспериментальной установки, используемой для диспергирования бурого угля и торфа, приведено на рисунке 4.1. Основные его технические характеристики указаны в таблице 4.1.



Рисунок 4.1 – Ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М» модель УЗТА-1/22-ОМ (вариант исполнения №2)

Таблица 4.1 – Технические характеристики

п/п	**Наименование**	**Значение**
1	Мощность, ВА, не более	1000
2	Частота УЗ воздействия, кГц	22±1,65
3	Питание от сети переменного напряжения, В	220±22

4	Интенсивность излучения, Вт/см^2, не менее	10
5	Диаметр многополуволнового рабочего инструмента, мм, максимальный/минимальны	30/18

Предложенная, разработанная и изготовленная экспериментальная установка (фото и эскиз конструктивной схемы) представлены на рисунке 4.2.

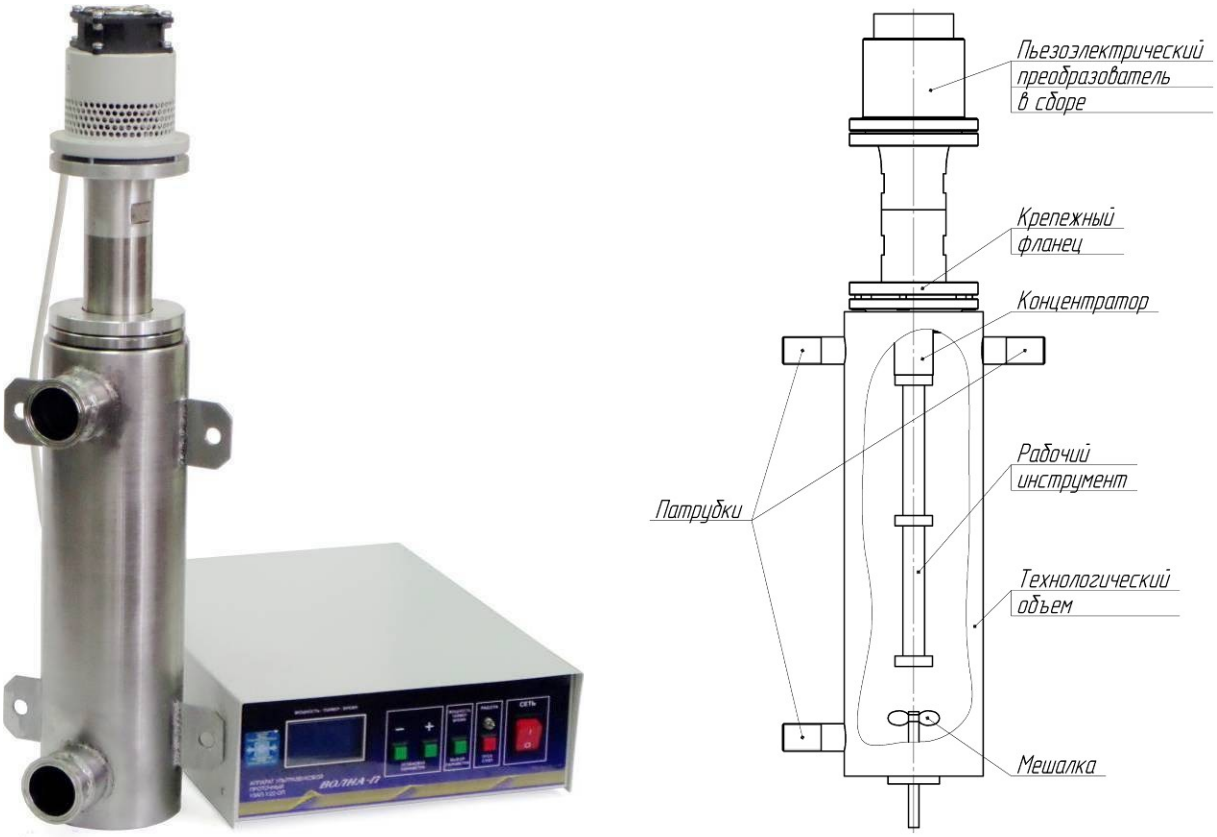


Рисунок 4.2 – Экспериментальная установка

Для создания равномерного УЗ воздействия на всю обрабатываемую технологическую среду использовалась мешалка. Патрубки применялись для создания и поддержания избыточного давления в технологическом объеме. Разовый обрабатываемый объем составил 1,5 литра. Время УЗ диспергирования – до 4 часов, т.е. технологический процесс проходил в периодическом режиме. Для компенсации нагрева и поддержания

температуры весь технологический объем погружался в водяную рубашку.

4.2 План проведения и результаты экспериментов

Так как целью проведения НИР являлось выявление оптимальных режимов УЗ диспергирования на примере бурого угля и торфа, был проведен ряд экспериментальных исследований при различном соотношении сырье: жидкая фаз и при разном избыточном давлении в обрабатываемой технологической среде.

УЗ диспергирование осуществлялось при соотношениях 1:7 и 1:10. Выбор таких соотношений обусловлен тем, что как при меньшем соотношении недостаточно жидкой фазы для возникновения кавитации внутри всего обрабатываемого технологического объема и образовывались застойные зоны отложения сырья даже при использовании перемешивающего устройства. При большем значении будут вырастать дальнейшие затраты на удаление жидкой фазы, если встанет вопрос о приготовлении порошка из полученной суспензии.

Избыточное давление было ограничено величиной 4 атм., так как его дальнейшее увеличение накладывает, во-первых, дополнительные требования к конструкции технологического объема, во-вторых, приведет к существенному увеличению мощности (а в ряде случаев это невозможно) используемого электронного генератора для возникновения кавитации. При использовании реальных аппаратов возникновения кавитации при давлениях в 7 атм. практически не происходит.

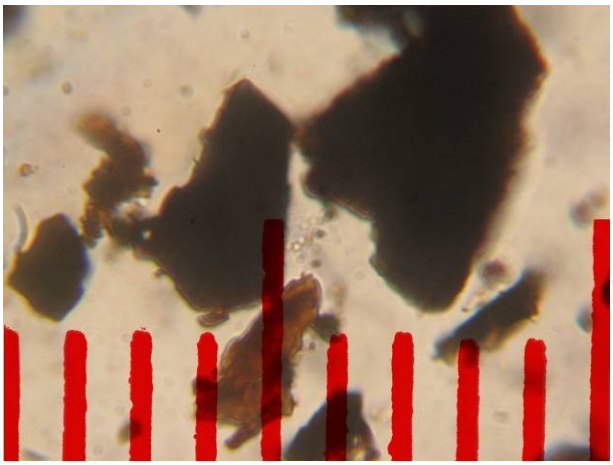
Проводимые экспериментальные исследования проводились неоднократно при равных условиях с целью набора статистических данных.

На 1,5 литра обрабатываемого технологического объема для соотношения сырье: жидкость 1:7 было взято 185 грамм бурого угля (или торфа) и 1295 грамм водопроводной воды, соответственно. Для соотношения 1:10 было взято 135 грамм бурого угля (или торфа) и 1350 грамм

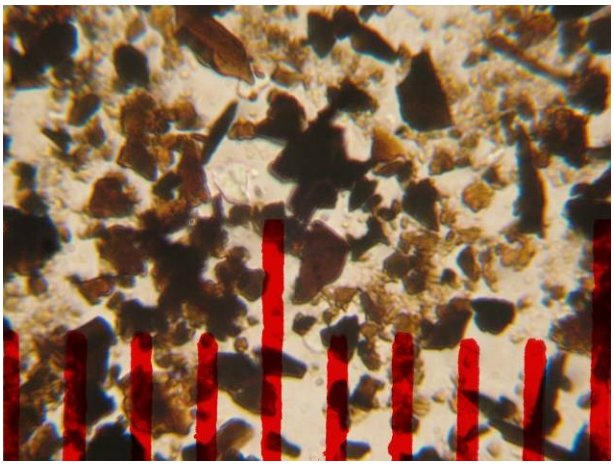
водопроводной воды, соответственно.

Время УЗ воздействия составило 4 часа.

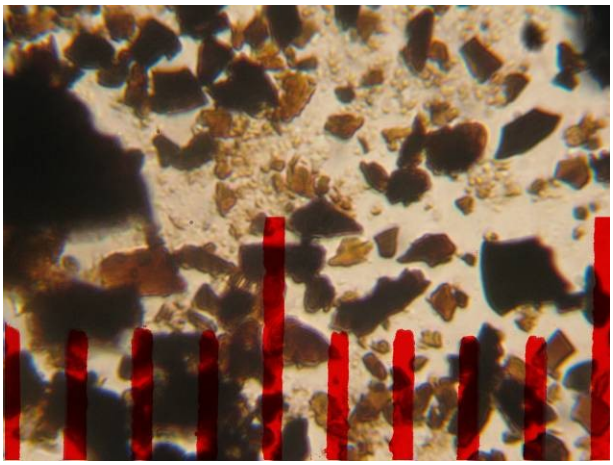
Результаты при 1000-м увеличении приведены на рисунках 4.3-4.6.



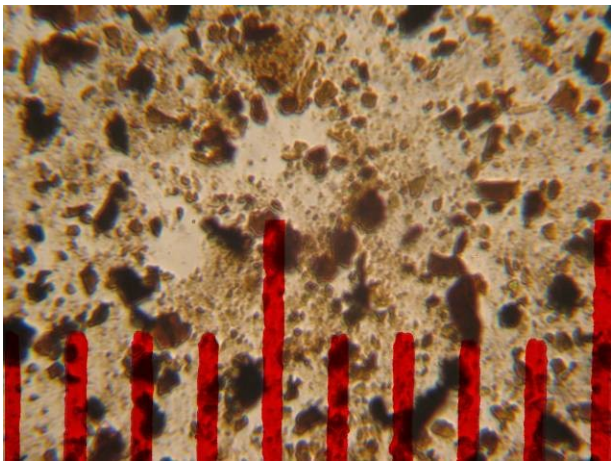
исходный



без давления



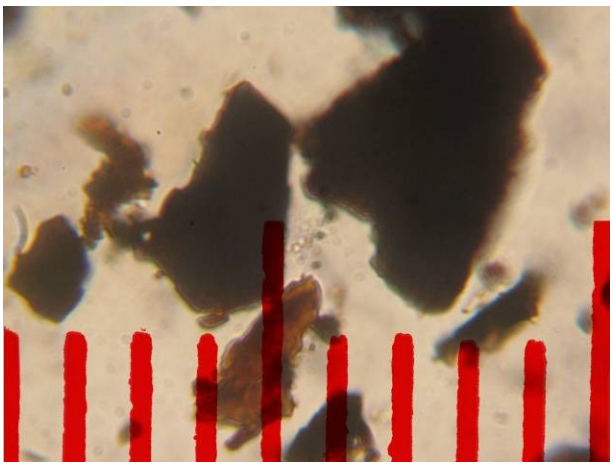
избыточное давление 2 атм.



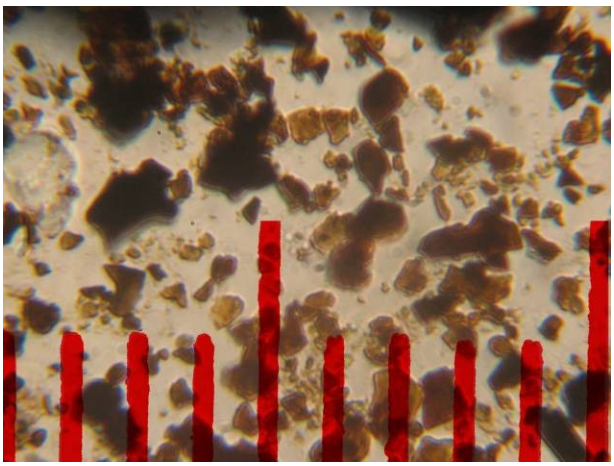
избыточное давление 4 атм.

Рисунок 4.3 – Бурый уголь при соотношении 1:7 при разном избыточном давлении

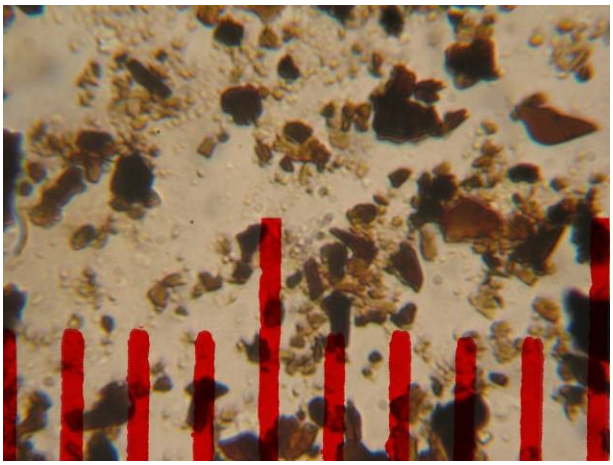
Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение бурого угля от среднего размера 30-40 мкм до среднего размера 2-5 мкм, т.е. 8-15 раз, хотя и присутствуют крупные частицы средним размером до 8-10 мкм.



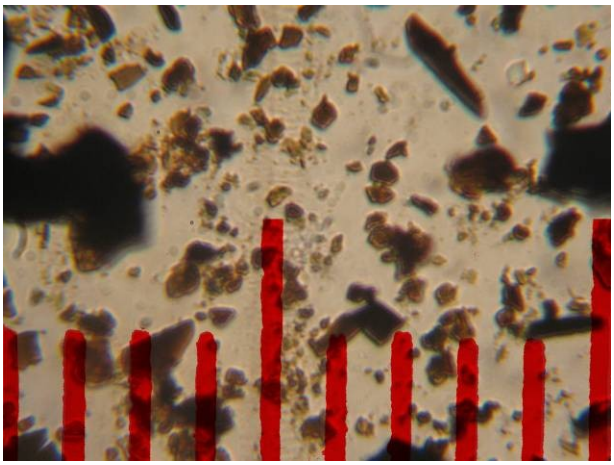
исходный



без давления



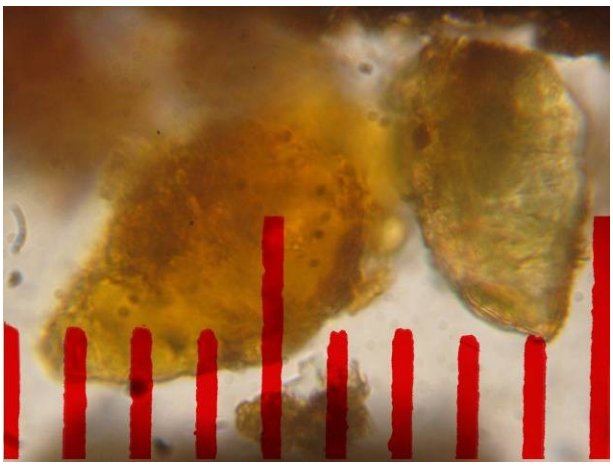
избыточное давление 2 атм.



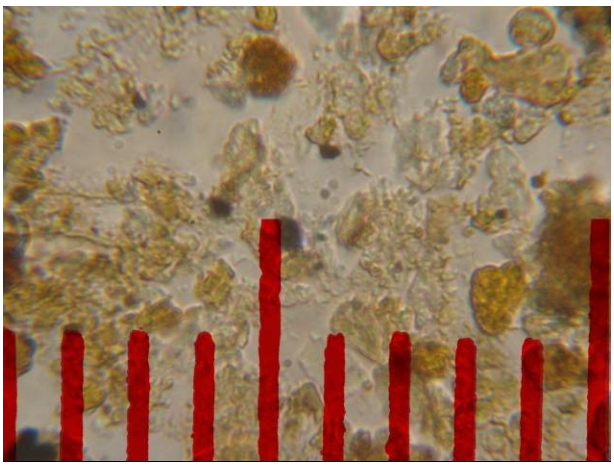
избыточное давление 4 атм.

Рисунок 4.4 – Бурый уголь при соотношении 1:10 при разном избыточном давлении

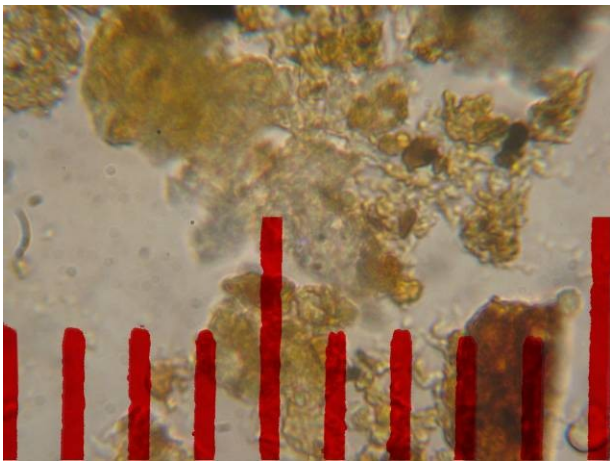
Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение бурого угля со среднего размера 30-40 мкм до среднего размера 2-5 мкм, т.е. 8-15 раз.



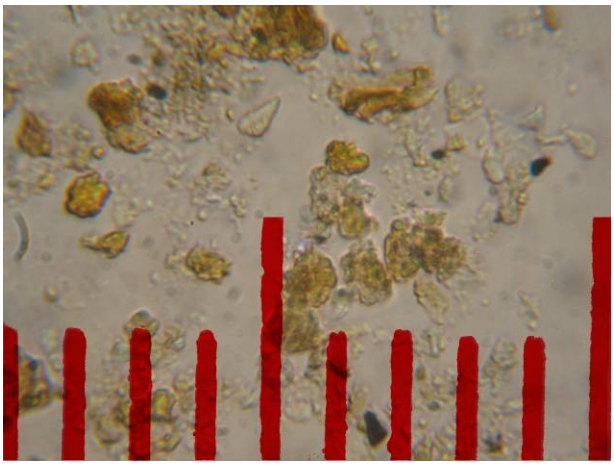
исходный



без давления



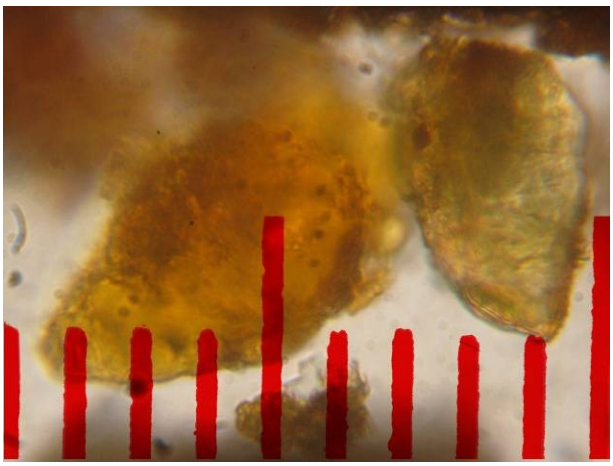
избыточное давление 2 атм.



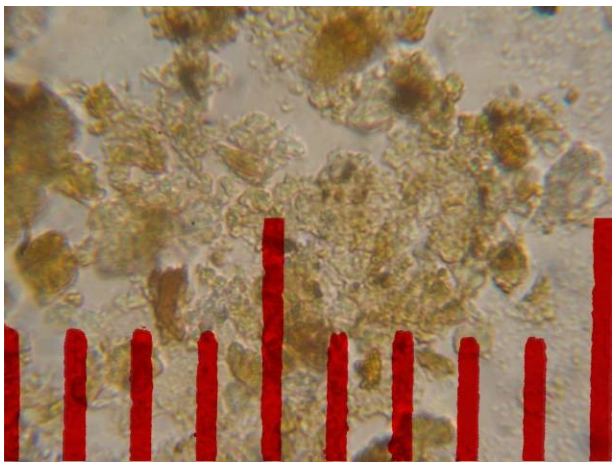
избыточное давление 4 атм.

Рисунок 4.5 – Торф при соотношении 1:7 при разном избыточном давлении

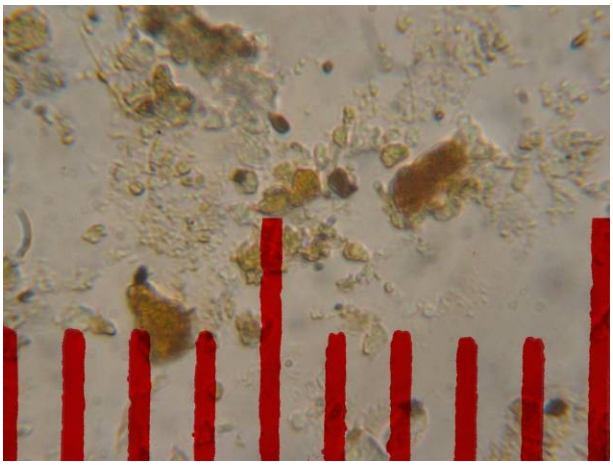
Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение торфа со среднего размера 70-80 мкм до среднего размера 2-5 мкм, т.е. 35-40 раз, хотя и присутствуют крупные частицы средним размером около 8-10 мкм.



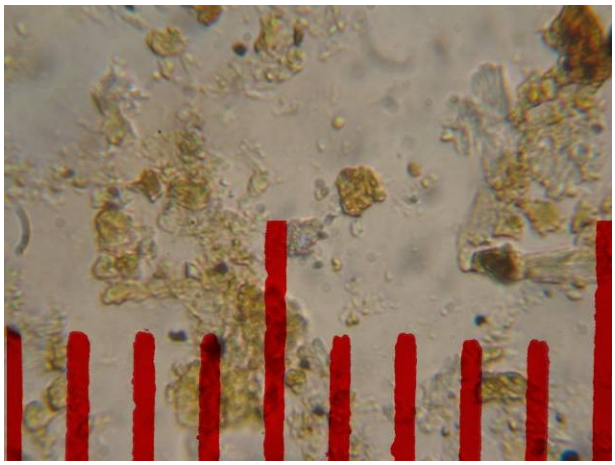
исходный



без давления



избыточное давление 2 атм.



избыточное давление 4 атм.

Рисунок 4.6 – Торф при соотношении 1:10 при разном избыточном давлении

Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение торфа со среднего размера 70-80 мкм для среднего размера 2-5 мкм, т.е. 35-40 раз, хотя и присутствуют крупные частицы средним размером около 8-10 мкм.

4.3 Выводы

Соотношение 1:7 для бурого угля более предпочтительнее, так как оно дает более равномерное распределение размеров частиц.

Соотношение 1:10 для торфа более предпочтительнее, так как оно дает более равномерное распределение размеров частиц.

Повышение избыточного давления в создаваемой обрабатываемой среде оказывает не существенное слияние на размер получаемых частиц бурого угля и торфа. Поэтому можно ограничиться избыточным давлением не более 2 атм.

УЗ воздействие в течение 4 часов уменьшает размер частиц бурого угля в 8-15 раз, а торфа – в 35-40 раз. Если исходная фракция используемого сырья не будет превышать 1-2 мкм, то при помощи УЗ диспергирования суспензии будет обеспечено получение частиц нанометрового диапазона.

Результаты анализа результатов УЗ диспергирования в течении промежуточных интервалов (0.5, 1,2.3, 4) часов, а также результаты диспергирования в течении 24 часов свидетельствую об практически о линейном (слабо экспоненциальном) характере зависимости размеров получаемых частиц от времени воздействия, что позволяет устанавливать временные интервалы воздействия для получения частиц заданных размеров.

5 УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Как было отмечено ранее – УЗ диспергирование это тонкое размельчение твердых частиц в жидкой среде (переход в дисперсное состояние). Поскольку такой процесс позволяет получать высокодисперсные, однородные, химически чистые порошки, получение которых часто не доступно существующим методам – механическим, химическим, термическим, его применение находит широкое распространение. Но поскольку, диспергированию подвергаются столь разнообразные материалы – возникает необходимость исследования процесса диспергирования различных материалов, в том числе и неорганических.

В отличие от диспергирования органических материалов, где основные механизмы диспергирования связаны с огромными перепадами давлений, возникающих при взрывах кавитационных пузырьков, при диспергировании неорганических материалов механизмов значительно больше.

Главные механизмы УЗ диспергирования таких материалов, как и при диспергировании органических материалов – кавитация и потоки, возникающие в рабочей жидкости при захлопывании кавитационных полостей. В ударной волне, распространяющейся от места захлопывания, максимальная амплитуда давления может достигать нескольких тысяч килограмм-сил на квадратный сантиметр. Следующая за ударной, волна с отрицательным давлением оказывает растягивающее воздействие, которое и приводит к разрушению частиц.

Но, при диспергировании неорганических веществ, по мнению и данным авторов ярко проявляются следующие механизмы диспергирования (которые не имели место при диспергировании органики).

1. Возникновение и распространение ударных волн по трещинам и порам твердых частиц. Об эффективности и работоспособности такого механизма свидетельствуют данные об увеличении скорости УЗ

диспергирования предварительно механически обрабатываемых частиц.

2. Расслаивание частиц по границам слоев, о чем свидетельствуют данные о разрушениях слоистых материалов (мукавиты).

3. Разрушение при механических соударениях частиц, о чем свидетельствует увеличение округлости сложных по форме частиц.

При этом факторы, влияющие на процесс диспергирования, более разнообразны:

1. Механические свойства и структура обрабатываемого материала, состояние его поверхности, геометрическая форма (чем выше твердость, тем труднее разрушается материал).

2. Жидкость, в которой происходит процесс, ее физико-механические и химические свойства (акустическое сопротивление, вязкость, кавитационная прочность и т.д.).

3. Скорость потоков рабочей жидкости в объеме. В процессе диспергирования, в основном, участвуют крупные частицы, а образующиеся при обкалывании мелкие частицы отталкиваются кавитационными или пульсирующими пузырьками, скапливаются и начинают затруднять процесс диспергирования. Поэтому необходимо интенсивное перемешивание.

4. Соотношение между статическим и звуковым давлением в обрабатываемом объеме; рекомендуемое избыточное давление в обрабатываемом объеме, как и в случае с органикой, не должно превышать 2-3 атм.

5. Температура обрабатываемой среды; например, в воде при нормальных условиях максимальное количество кавитационных пузырьков образуется при 40-60ºС.

6. Частота УЗ воздействия; чем выше, частота, тем больше количество энергии, запасаемое в кавитационном пузырьке. Но для обеспечения того же эффекта (или той же интенсивности воздействия) при увеличении частоты в два раза необходимо увеличить мощность в четыре раза. Увеличение мощности в ряде случаев не представляется возможным.

7. Интенсивность УЗ давления; должна быть не менее 5-7 Вт/см^2, однако увеличение интенсивности свыше 10-15 Вт/см^2 препятствует выходу акустической энергии и снижает эффективность диспергирования.

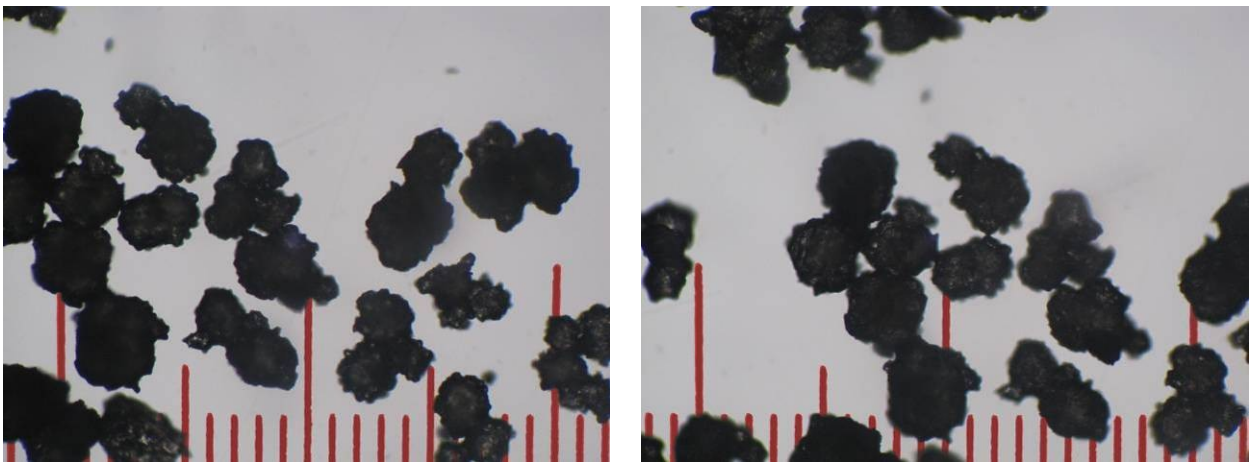
8. Время ультразвукового воздействия; чем дольше время воздействия, тем лучше идет диспергирование.

9. Частицы порошка, полученного ультразвуковым диспергированием, имеют "выглаженную" поверхность.

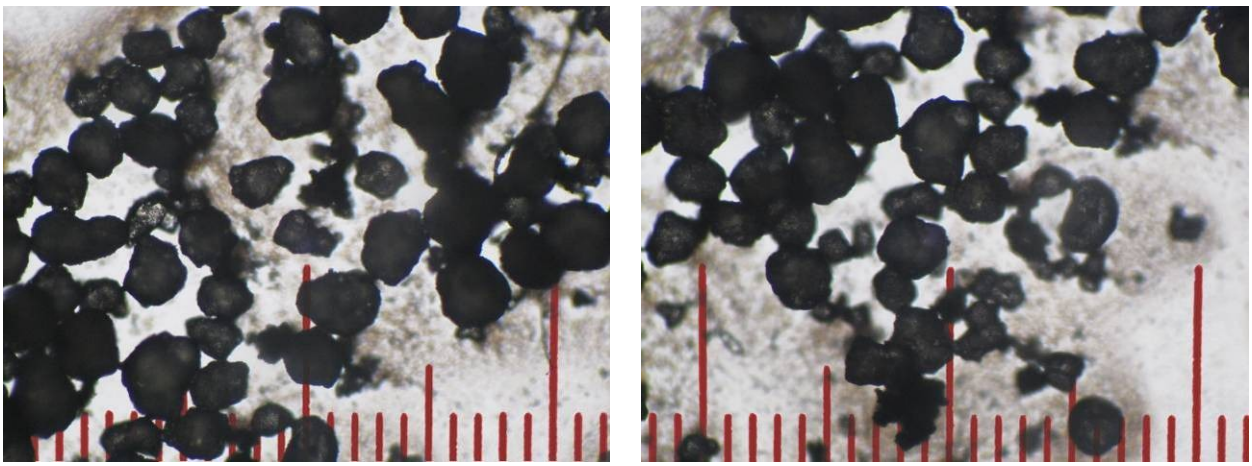
Далее приведены результаты серии опытов по выявлению режимов УЗ диспергирования неорганических веществ на примере флюоресцентного порошка (неорганические окислы металлов), для приготовления красок и оксида алюминия, который применяется при получении газобетона Обработка осуществлялась на УЗ оборудовании, приведенном на рисунке 4.2.

Для флюоресцентного порошка соотношение сырье: жидкость составило 1:10 – на 100 грамм флюоресцентного порошка было взято 1000 грамм воды, время УЗ воздействия составило 4 часа. Избыточное давление в обрабатываемой среде не создавалось.

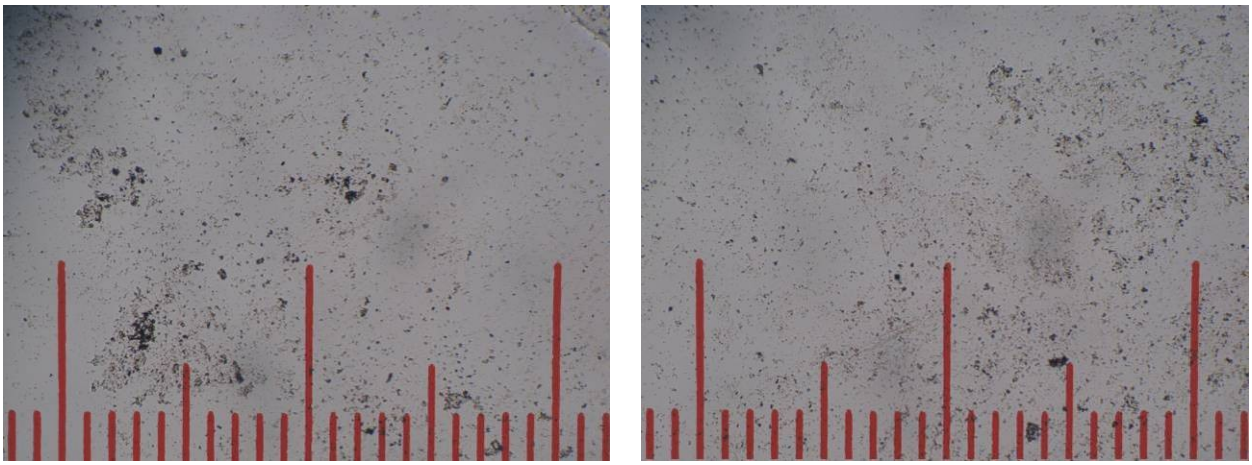
Полученная суспензия осаждалась в течение одного часа. Пробы были взяты с разных уровней обработанной суспензии. Результаты, полученные при 400-х кратном увеличении, приведены на рисунке 5.1 (цена деления составляет 10 мкм).



исходный



образец с нижнего слоя



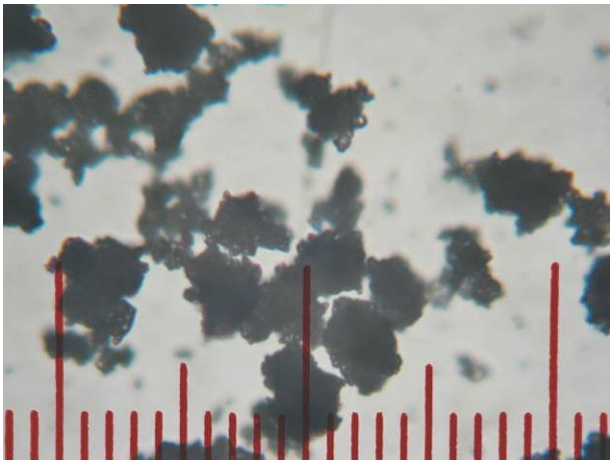
образец с верхнего слоя

Рисунок 5.1 – Флюоресцент при соотношении 1:10 без избыточного давления

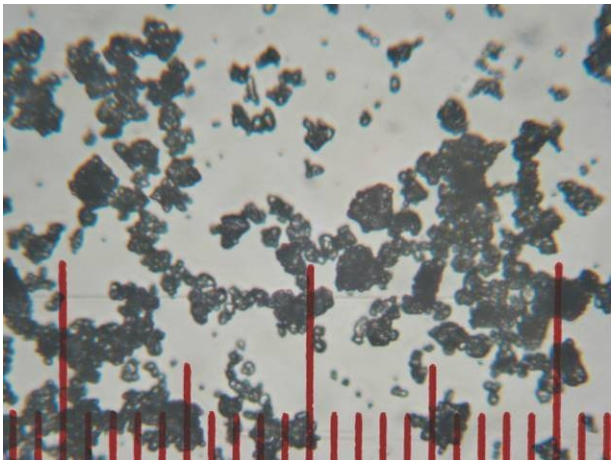
Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение флюоресцентного порошка со среднего размера 40-50 мкм до среднего размера 25-30 мкм для нижнего слоя осажденного вещества и менее 1 мкм для верхнего слоя, т.е. более чем в 50 раз (для нижнего слоя).

Для порошка оксида алюминия соотношение сырье: жидкость составило 1:5 – на 400 грамм порошка оксида алюминия было взято 2000 грамм воды, время УЗ воздействия варьировалось в пределах от 1 часа до 6 часов. Избыточное давление в обрабатываемой среде не создавалось.

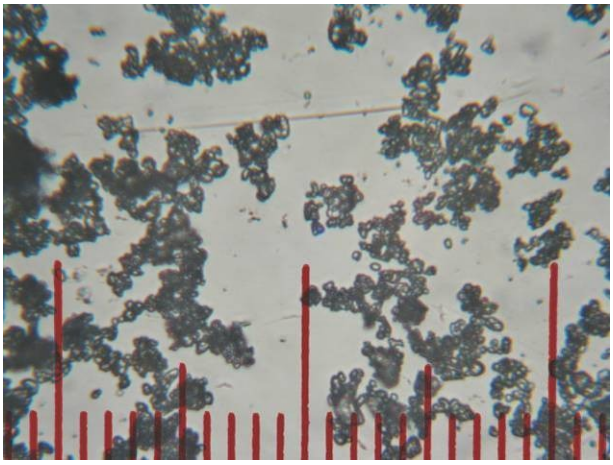
Результаты, полученные при 400-х кратном увеличении, приведены на рисунке 5.2.



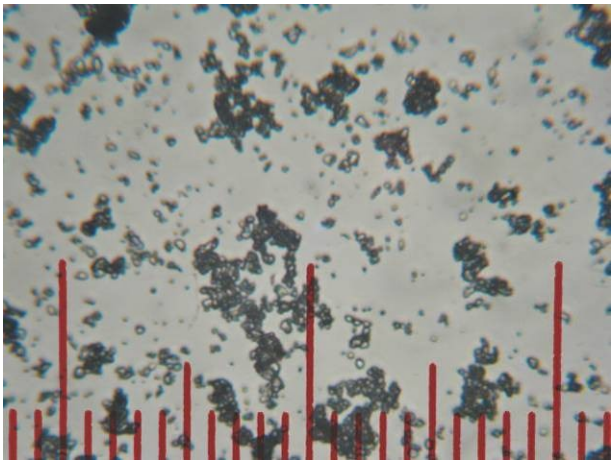
исходный



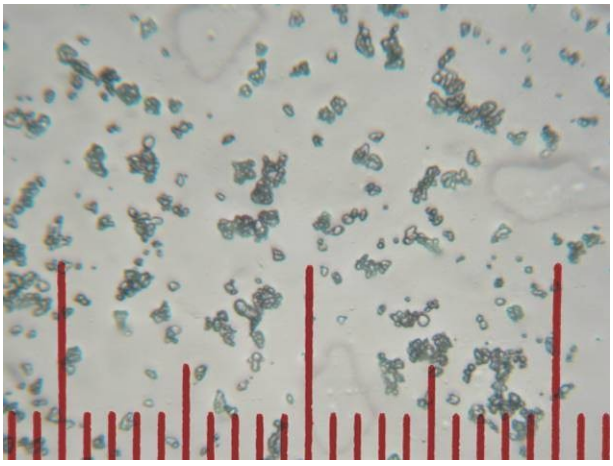
1 час



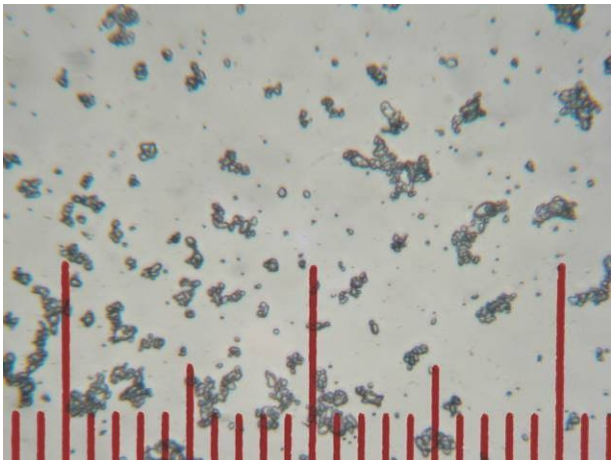
2 часа



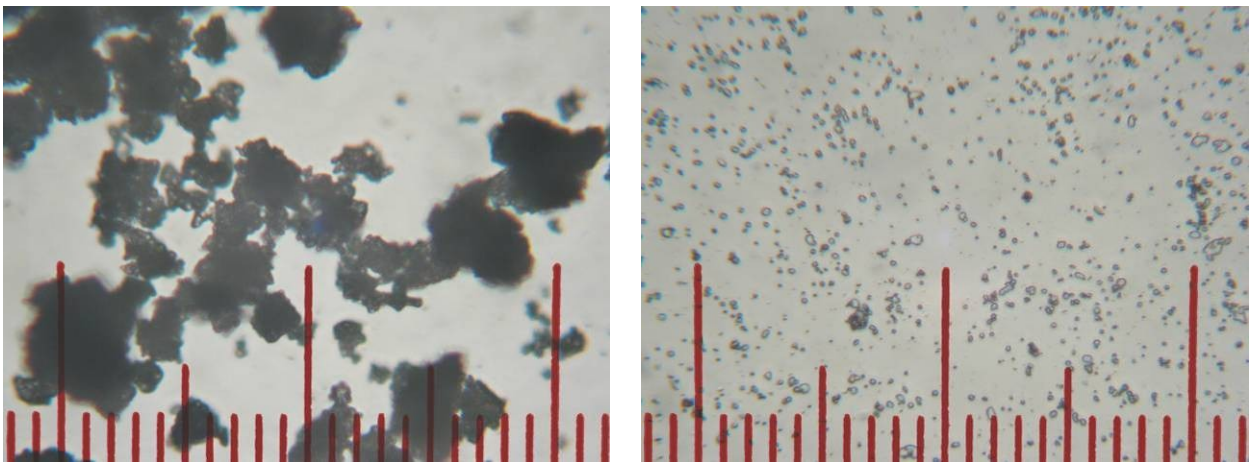
3 часа



4 часа



5 часов



исходная 6 часов

Рисунок 5.2 – Оксид алюминия 1:5 без избыточного давления при разном времени воздействия

Анализируя полученные данные можно утверждать, что произошло измельчение порошка оксида алюминия со среднего размера 20-30 мкм до среднего размера в 1-2 мкм, т.е. в 15-20 раз.

6 ПРОЕКТ ПРОМЫШЛЕННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГАТОРА

По результатам, приведенным в таблицах 3.2 и 3.3 следует, что УЗ технологический аппарат «БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОП, УЗАП-8/22-ОПГ (конструктивные варианты исполнения №1-№3) характеризуется такими же удельными акустическими характеристиками, что и аппарат, на котором проводили экспериментальные исследования.

Таким образом, в качестве макетного образца промышленного УЗ диспергатора УЗ технологический аппарат «БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОПГ (вариант исполнения №3), приведенный на рисунке 6.1. Основные его технические характеристики указаны в таблице 6.1.



Рисунок 6.1 – Ультразвуковой технологический аппарат «БУЛАВА-П» модель УЗАП-8/22-ОПГ (вариант исполнения №3)

Таблица 6.1 – Технические характеристики

п/п	**Наименование**	**Значение**
1	Мощность, ВА, не более	8000
2	Частота УЗ воздействия, кГц	22±1,65
3	Питание от сети переменного напряжения, В	380±38
4	Интенсивность излучения, Вт/см^2, не менее	7,5
5	Диаметр многополуволнового рабочего инструмента, мм, максимальный/минимальны	70/50

Предлагаемое оборудование позволит в промышленных условиях реализовать технологию УЗ диспергирование бурого угля и торфа с целью получения суспензий с частицами нанометрового диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований были получены следующие результаты.

1. Подтверждена принципиальная возможность УЗ диспергирования бурого угля и торфа до наночастиц.
2. Показана нецелесообразность повышения избыточного давления в обрабатываемой технологической среде свыше 2 атм.
3. Установлены оптимальные соотношения при УЗ диспергировании: для бурого угля – 1:7, для торфа – 1:10.
4. Показано, что УЗ воздействие в течение 4 часов уменьшает размер частиц бурого угля в 8-15 раз, а торфа – в 35-40 раз.
5. Показано, что УЗ воздействие в течение 4 часов уменьшает флюоресцентный порошок со среднего размера 40-50 мкм до среднего размера 25-30 мкм для нижнего слоя и менее 1 мкм для верхнего слоя, т.е. более чем в 50 раз (для нижнего слоя).
6. Показано, что УЗ воздействие в течение 6 часов уменьшает порошок оксида алюминия со среднего размера 20-30 мкм до среднего размера 1-2 мкм, т.е. в 15-20 раз.
7. Предложен макетный образец промышленного УЗ диспергатора для получения суспензий с частицами нанометрового диапазона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новицкий, Б.Г. Стадии раскалывания частиц под действием ударных волн [Текст] / Б.Г. Новицкий, В.М. Фридман // Ультразвуковая техника: сборник статей. – М., 1964. – № 5. – С. 52–60.

2. Фридман, В.М. Отстаивание в ультразвуковом поле [Текст] / В.М. Фридман // Ультразвуковая техника: сборник статей. – М., 1967. – № 6. – С. 47–51.

3. Думитраш, П.Г. Диспергирование и гомогенизация дисперсных систем в акустическом поле [Текст] / П.Г. Думитраш, М.К. Болога // Электронная обработка материалов. – 2007. – №2. – С. 71–74.

4. Никитин, Ю.Н. Выбор метода ультразвукового диспергирования отходов медного порошка [Электронный ресурс] / Ю.Н. Никитин, А.В. Журавлева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2013. – № 1 (14). – С. 227–232. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/rtvotmm_2013_1_29.pdf

5. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: дис. канд. техн. наук.: 05.17.08: защищена 25.09.14: утв. 22.01.15 / Голых Роман Николаевич. – Бийск, 2014. – 193 с.

6. Мощные ультразвуковые поля [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.:Наука, 1968. – 268 с

7. Golykh, R.N. Theoretical and experimental study of cavitation dispersing in "liquid-solid" system for revelation of optimum influence modes [Текст] / R.N. Golykh // Americal Journal of Engineering Research. – 2016. – Iss. 1. – P. 159-168.

8. Khmelev, V.N. Determination of Optimum Conditions of Ultrasonic Cavitation Treatment of High-viscous and Non-newtonian liquid media [Текст] / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, V.E. Bazhin, V.A. Nesterov // 16th

International Conference of Young Specialists on Micro|Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 208-212.

9. Каталог. Режим доступа: http://u-sonic.com/catalog/apparaty_dlya_protochnoy_obrabotki_zhidkikh_sred/